

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské
metrologie

Dokončování součástí po procesu SLM pomocí
nekonvenčních aplikací se zaměřením na vnitřní
struktury

Post Finishing Parts Made by SLM Technology with
Unconventional for Internal Structures

Student: Nevrlý Patrik

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Patrik Nevrlý**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Dokončování součástí po procesu SLM pomocí nekonvenčních aplikací
se zaměřením na vnitřní struktury**
**Post Finishing Parts Made by SLM Technology with Unconventional for
Internal Structures**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Experimentální návrh řešení problematiky.
4. Kvalitativní zhodnocení řešeného návrhu.
5. Technicko - ekonomické zhodnocení.
6. Diskuze a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


HAJNYS, J.; PAGAC, M.; ZLAMAL, T.; PETRU, J.; KOUSAL, L. *Stiffness of 316L stainless steel support structures proposed for the SLM process* MATEC Web of Conferences. vol. 244, 2018
TIANLIN, Z.; KETAI, H.; HUAIXUE, L.; LECHANG, Y. *Mechanical properties of lightweight 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting*, Materials & Design, Volume 181, 2019
GROBMAN, A.; GOSMANN, J.; MITTELSTEDT, CH. *Lightweight lattice structures in selective laser melting: Design, fabrication and mechanical properties*, Materials Science and Engineering: A, Volume 766, 2019

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě
14. 5. 2020

.....


Podpis autora práce

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- беру на вѣдомі же Высoká škola baňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít toto dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі – že podle zákona č. 111/1998, Sb., o vysokých školách a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna Ústřední v knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě
14. 5. 2020

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Nevrlý Patrik

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Horní náměstí 78/16,
Šternberk

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

NEVRLÝ, P. *Dokončování součástí po procesu SLM pomocí nekonvenčních aplikací se zaměřením na vnitřní struktury*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 72 stran. Vedoucí práce: Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá problematikou dokončovacích operací na součástech s vnitřní strukturou vyrobených procesem SLM, a zhodnocením výsledků těchto operací. První část této práce je věnovaná souhrnu informací potřebných k pochopení postupu a výsledkům experimentální části. Tato část obsahuje kapitoly, které vysvětlují funkci a vlastnosti vnitřních struktur zhotovených 3D tiskem, dále informace o principu metody aditivní technologie SLM a také vysvětlení základů použitých technologií, tedy: elektrochemické leštění, leštění pomocí plazmy, tryskání a je uvedeno i honování AFM, které však nebylo v experimentální části aplikováno. Poslední kapitola teoretického rozboru zmiňuje poznatky o měření povrchů. Bakalářská práce pokračuje návrhem a představením experimentu a poté již obsahuje informace a data o naměřených výsledcích. Cílem bakalářské práce je porovnat mezi sebou jednotlivé dokončovací technologie, a pokud možno vybrat tu nejvhodnější. V závěru experimentu je provedeno vyhodnocení a posouzení dokončovacích technologií na základně naměřených výsledků. Závěr také obsahuje objektivní diskusi výsledků autorem práce.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

NEVRLÝ, P. *Post Finishing Parts Made by SLM Technology with Unconventional for Internal Structures*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 72 pages. Supervisor: Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

This bachelor's thesis deals with finishing operations on parts with lattice structure created via SLM process and their evaluation. Information necessary for process understanding and experimental part is summarized in the first part. It is divided into chapters which detailing the functions and characteristics of structures created via 3D printing, information regarding principles of SLM additive manufacturing and explanation of the basics of technologies used: electropolishing, plasma electrolytic polishing, blasting, and AFM (not used in the experimental part). Surface measurement findings are presented in the last chapter of the first part. The experiment itself is presented in the following part, alongside information regarding measured data and results. The goal of this thesis is to compare each finishing technology and select the most fitting one.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	8
Úvod.....	10
1. SLM Lattice (vnitřní, mikroprutové) struktury	11
1.1 Vzpěrné lattice struktury.....	12
2. Aditivní technologie – Selektivní laserové tavení (SLM).....	15
2.1 Metoda za pomoci spékání práškové vrstvy	15
2.2 Princip SLM.....	15
2.3 Procesní parametry SLM	16
2.3.1 Vliv výkonu a skenovací rychlosti.....	17
2.3.2 Strategie skenování	17
3. Dokončovací operace	19
3.1 Elektrochemické leštění.....	19
3.1.1 Princip metody elektrochemického leštění	19
3.1.2 Předúprava kovového povrchu.....	20
3.2 Leštění pomocí plazmy	20
3.2.1 Vznik paroplazmové obálky.....	21
3.2.2 Mechanismus vyhlazování povrchového reliéfu.....	23
3.3 Protlačovací honování AFM.....	24
3.3.1 Technologie AFM	25
3.3.2 Honovací médium	26
3.4 Tryskání	27
3.4.1 Pneumatické tryskání	27
3.4.2 Tryskací prostředky.....	29
4. Drsnost povrchu a jeho měření	32
4.1 Parametry profilu povrchové drsnosti.....	32
4.2 Plošné parametry drsnosti povrchu.....	34
4.3 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5.....	36
5. Experimentální část.....	38
5.1 Experimentální vzorky.....	38
5.1.1 Materiál experimentálních vzorků	40

5.1.2 Výroba experimentálních vzorků	40
5.1.3 Tiskárna RENISHAW AM400	41
5.2 Výchozí parametry drsnosti	42
5.2.1 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 1	43
5.2.2 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 2	43
5.2.3 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 3	44
5.2.4 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 4	44
5.3 Elektrochemické leštění	45
5.3.1 Výsledky měření vzorku ze Série 1 po elektrochemickém leštění	45
5.3.2 Výsledky měření vzorku ze Série 2 po elektrochemickém leštění	46
5.3.3 Srovnání naměřených výsledků	47
5.4 Leštění plazmou	48
5.4.1 Výsledky měření vzorku ze Série 4 po leštění plazmou	49
5.4.2 Srovnání naměřených výsledků	50
5.5 Tryskání	51
5.5.1 Výsledky měření vzorku ze Série 2 po tryskání hnědým korundem a ocelovým granulátem	53
5.5.2 Výsledky měření vzorku ze Série 1 po tryskání hnědým korundem	54
5.5.3 Výsledky měření vzorku ze Série 3 po tryskání ocelovým granulátem	55
5.5.4 Srovnání naměřených výsledků	56
5.2 Celkové zhodnocení naměřených výsledků	57
6. Závěr	61
Seznam použité literatury	64

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Význam	Jednotka
2D	2-Dimensional – Dvourozměrná	[–]
3D	3-Dimension – Třírozměrná	[–]
AFM	Honování proudícím abrazivem (Abrasive flow machining)	[–]
CAD	počítačem podporované kreslení (Computer Aided Design)	[–]
I	elektrický proud	[A]
M	Maxwellovo číslo	[–]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rp	Největší výška výstupku profilu	[μm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
S _A	Plocha anody	[m ²]
Sa	Průměrná aritmetická výška plochy	[μm]
S _K	Plocha katody	[m ²]
SLM	Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting)	[–]
Sp	Největší výška omezené stupnice povrchu	[μm]
Sv	Největší hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	[μm]
Sz	Největší výška plochy	[μm]
T _A	Teplota anody	[°C]
T _K	Teplota katody	[°C]
i _A	proudová hustota na anodě	[A·mm ⁻²]
i _K	proudová hustota na katodě	[A·mm ⁻²]
n	počet uzlů	[–]

s	počet vzpěr	[–]
q	elektrický náboj	[C]
α_o	koefficient disociace	[–]
σ	měrná elektrická vodivost elektrolytu	[$S \cdot m^{-1}$]

Úvod

Aditivní metody výroby jsou v současné době dostupnější než kdykoliv dříve a dostávají se stále více do popředí jak ve výzkumných laboratořích, tak i v průmyslových společnostech. Jedním z hlavních důvodů volby této metody je možnost vyrábění součástí, takových tvarů a rozměrů, které by jinou technologií buďto nebylo možno vyrobit, nebo by jejich výroba byla ekonomicko-hospodářsky nevýhodná. Stejně jako mnoho ostatních výrobních technologií i tato technologie vždy nebývá konečným krokem úplného zhotovení navržené součásti. Aditivní technologie po sobě zanechávají nežádoucí stopy jakožto důsledek především tepelných účinků vznikajících při procesu. Tyto stopy nepříznivě ovlivňují vlastnosti povrchové vrstvy součásti, a to především drsnost povrchu.

V mnohých průmyslových odvětvích, jako například biomedicinském a leteckém průmyslu, je kladen požadavek na minimální hmotnost použitých součástí. Nízká hmotnost dílu v kombinaci s vysokými mechanickými vlastnostmi je klíčovým aspektem při snižování provozních nákladů. Často je požadavek na nízkou hmotnost splněn správným dimenzováním konstrukce a změnou rozměru nebo zhotovováním např. dutých prvků konstrukcí. Moderní metody aditivní technologie však přináší mnohdy lepší alternativu. Za pomoci topologicko-optimalizačních experimentů byly vytvořeny tzv. lattice struktury, jež mají příznivé vlastnosti v oblasti úspory hmotnosti. Kvůli teprve rannému výzkumu těchto struktur není v české technické literatuře definován doslovný překlad lattice struktur, ale dohledatelné jsou verze jako „vnitřní struktury“, „mikroprutové struktury“ nebo „sítové struktury“. V této bakalářské práci se používá především originální pojem z anglického jazyka „lattice struktura“. Hlavní předností těchto struktur je jejich malá hmotnost při zachování vysoké pevnosti. Nahrazením plného materiálu touto strukturou může vést k velkým hmotnostním úsporám při zachování pevnostních i bezpečnostních podmínek. Princip lattice struktur je uveden v první kapitole bakalářské práce.

Při 3D tisku kovových materiálů dochází k tavení použitého materiálu. Tavení, popř. natavení, ovlivňuje i výsledný povrch zhotovené součásti. Povrch takto zhotoveného dílce nemívá přijatelnou drsnost, jelikož obsahuje značné nerovnosti jakožto důsledek teplotního ovlivnění, které je při 3D tisku nevyhnutelné. U lattice struktur jsou viditelné především malé kuličky ležící na povrchu součásti, podobné těm, které vznikají při svařování důsledkem rozstříku roztaveného kovu. Tyto nedokonalosti povrchu jsou nežádoucí. Proto bylo navrženo, a na vtištěných vzorcích aplikováno, několik nekonvenčních dokončovacích metod, které jakost povrchu zvýší. Cílem bakalářské práce je tedy vyhodnotit a porovnat drsnosti povrchu vytisknutých a opracovaných vzorků ale také porovnat účinky a vhodnost vybraných dokončovacích technologií.

1. SLM Lattice (vnitřní, mikroprutové) struktury

Moderní aditivní výroba umožňuje vytváření pevných, málo vážících, konstrukčních struktur, s tvarovou geometrií, kterých by nebylo možné dosáhnout za pomoci tradičních výrobních metod, jako je obrábění nebo tváření [1]. Lattice struktury jsou topologicky navrhované, tří rozměrné síťové (open-celled) struktury, složené z jedné nebo více opakujících se sjednocených buněk [15,19]. Tyto buňky jsou definovány rozměry a typem vazby jejich vzpěrných elementů. Vzpěrné elementy jsou spojeny ve specifických uzlech. Na celulární úrovni můžou být lattice (volně přeloženo také jako mikroprutové) struktury považovány za strukturální druh materiálu, jelikož mají vlastnosti a funkce, takového materiálu, ale zároveň, vezmeme-li v potaz obecné strukturální rozdělení, lattice struktury vykazují chování homogenního meta-materiálu [27].

Postupným vylepšováním parametrů a vlastností lattice struktur, jako je optimalizace cell topologie (spoje) nebo optimalizace její geometrie (velikost buněk a rozměry vzpěr), je možné docílit velkých změn fyzikálních vlastností tohoto materiálu, kterých by původní materiál (kov ve formě prášku), nebyl schopen [32]. a to včetně akustických [53], dielektrických [54] a mechanických [55] vlastností. AM lattice struktury byly vynalezeny, aby výrazně překonávaly vlastnosti a využití materiálů s celulární strukturou, vytvořené alternativní výrobní metodou, a to při zachování stejné pórovitosti [37]. Lattice struktury, oproti jiným materiálům, nabízejí lepší kontrolu nad geometrií struktury a lepší předvídatelnost, kterou poskytují alternativní metody výroby [15].

Značný přínos a užitečnost těchto lattice struktur pro průmysl, přispívá k dalším důležitým výzkumům tohoto materiálu, především pro odvětví biomedicinské [39] a kosmického výzkumu [42]. V biomedicíně průmyslu je využití lattice struktur možné například ke snížení tuhosti kovových implantátů, což by přispělo k vytvoření napodobenin kostí [32]. Konstrukce používané pro odvětví kosmického výzkumu, využívají lattice struktury pro jejich vynikající poměr mezi pevností a hmotností a pro jejich dobrou tepelnou vodivost [43]. Díky strukturální jednotnosti [51] poskytují, oproti například alternativní kovové pění [56], technickou výhodu pro absorpci energie, při kolapsu součástí.

Přírodní celulární (nebo také buněčné) materiály jako je dřevo, korek a kost byly a jsou využívány po celá století, a jejich struktura je napodobována i v moderních konstrukčních materiálech jako jsou uměle vyráběné voštiny a pěny [57]. Celulární struktury jsou výhodnou možností pro mnohá konstrukční a designové řešení, zejména pro jejich malou hmotnost v poměru s vysokou pevností a tuhostí, kterou nabízejí díky své porézní struktuře [58]. Existuje mnoho druhů vyráběných celulárních struktur a velká rozmanitost možností pro jejich zhotovení.

Kovová pěna je forma celulární struktury, která je vyrobená pomocí práškové metalurgie, kdy se do zpráškovaného kovu přidá hydrid titanu, který při zahřátí v uzavřené

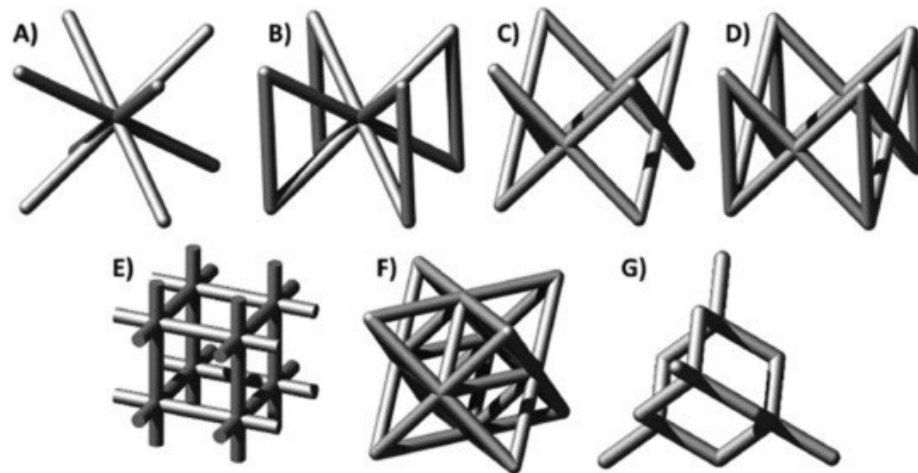
formě vytváří uvnitř kovu bubliny [59]. Mnohé studie [60,61] zjišťovaly možné využití, kovové pěny, pro její vlastnosti jako je absorpce energie v kombinaci s její malou hmotností [60]. Přestože výroba kovové pěny není příliš finančně nákladná, její využití je značně omezeno. Skládá se totiž ze stochastického (náhodného) uspořádání otevřených i zavřených buněk. Tato stochastická struktura způsobuje nekonzistentní mechanickou stálost, která je nežádoucí vzhledem k bezpečnosti navrhovaných konstrukcí [61].

Lattice struktury jsou jiným typem celulárního materiálu, který, na rozdíl od kovových pěn, má strukturu poskládanou z pravidelných opakujících se sjednocených buněk [62]. Gibson definuje celulární materiály jako materiály poskládané z „propojené sítě vzpěr nebo ploch“ [63]. Ashby dále stanovil že lattice struktury, jakožto forma celulárního materiálu, se liší především v měřítku velikosti, sjednocené buňky lattice struktur se totiž pohybují v měřítku milimetrů a micrometrů [64]. To znamená, že zatímco sjednocené buňky lattice struktury mohou být analyzovány jakožto konstrukce za použití klasické mechaniky, lattice struktury by měly být posuzované za materiály s vlastními mechanickými vlastnostmi, což umožňuje přímé srovnání mezi vlastnostmi lattice struktury a vlastnostmi původního materiálu, ze kterého byla lattice struktura zhotovená. Původním materiálem je myšlen materiál kovového prášku, použitého při 3D tisku (viz kapitola 2).

Lattice struktury mohou být, na základě jejich mechanických vlastností, obecně kategorizovány jakožto ohybu-vzdorné nebo tlaku vzdorné. Ohybu-poddajné struktury jsou namáhány větším ohybovým momentem, na rozdíl od tlaku vzdorných struktur, které jsou namáhány osovým (axiálním) zatížením. Topologie buněk lattice struktury, určuje, zdali je daná struktura tlaku-poddajná nebo ohybu poddajná [65].

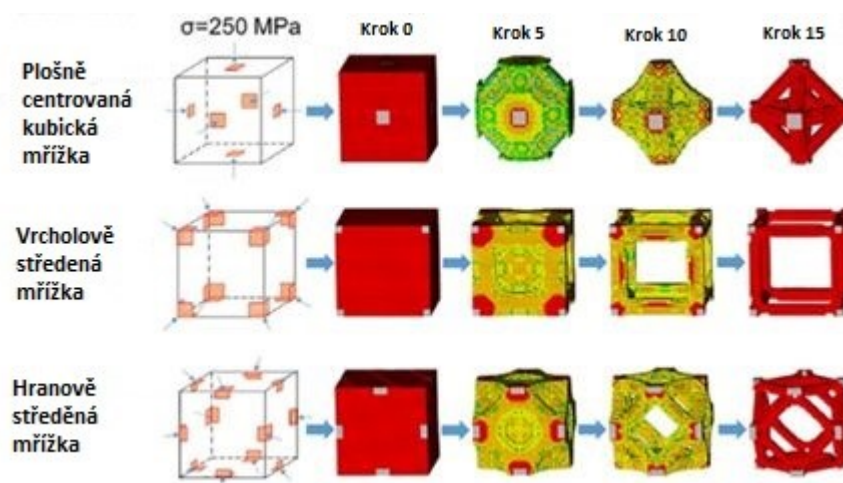
1.1 Vzpěrné lattice struktury

Nejběžnější topologii buněk zkoumaných vzpěrných lattice struktur jsou středově-středěná kubická a plošně-středěná kubická mřížka, nebo jejich variace (viz Obr. 1), například přidáním vzpěry do osy z, které jsou analogicky pojmenovány po krystalických mřížkách [51]. Existují i další topologie založené na vzpěrách, a to kubická, a diamantová mřížka nebo izotropní osmistěn v průniku s čtyřstěnem [27].



Obr.1 Vzpěrné lattice struktury: prostorově-středěná kubická mřížka (A), prostorově-středěná mřížka s vazbami v ose Z (B), plošně-středěná kubická mřížka (C), plošně-středěná kubická mřížka se vzpěrou v ose (D), kubická mřížka (E), izotropní osmistěn v průniku s čtyřstěnem (F), diamantová mřížka (G) [51]

Tyto vzpěrné topologie jsou často používány pro jejich jednoduchý design [66], ale také protože byly vygenerovány z topologicko-optimalizačních experimentů, které měly za úkol maximalizovat efektivnost rozdělení materiálu v lattice struktuře a co nejvíce využít možností, které aditivní metody výroby nabízí. Postup optimalizace je zobrazen na obrázku níže. [66,67].



Obr.2 Topologicky optimalizované vzpěrné sjednocené buňky [66]

Vzpěrná topologie může být charakterizovaná tzv. Maxwellovým číslem $M(1.1)$, které se odvíjí od hodnot parametrů jako je počet vzpěr s a počet uzlů n [68].

$$M = s - 3n + 6 \quad (1.1)$$

Pokud je $M < 0$, obsahuje struktura příliš málo vzpěr k tomu, aby vyvážila vnější působící síly, aniž by vznikl ohybový moment v uzlech, který způsobuje ohybové napětí vznikající

ve vzpěrách, což vede k tomu, že materiál vykazuje chování ohybu poddajného materiálu. Naopak je-li $M \geq 0$, vnější zatížení potom způsobuje ve vzpěrách osově napětí, což znamená, že nedochází k ohybu v místech uzlů, a tvoří tyto struktury tlaku poddajné [69]. Kvůli tomuto jevu jsou tlaku poddajné struktury více tuhé a pevné, zatímco ohybu poddajné struktury jsou značně slabší a je u nich častější výskyt deformací [64].

2. Aditivní technologie – Selektivní laserové tavení (SLM)

V posledních dvou desetiletích se metody aditivní technologie stávají více oblíbenou a používanou volbou jakožto způsob pro zhotovení součástí. Tyto technologie, a především 3D tisk, umožňují vytvářet výrobky s geometricky složitějšími tvary, které jsou často nejlepším konstrukčním řešením, a nebyly by vyrobitelné jinou konvenční metodou. Proto začínají být v oblibě u konstruktérů, kterým 3D tisk usnadňuje práci při řešení složitých konstrukčních problémů a dává jim větší možnosti pro kreativitu. 3D tisk kovů umožňuje rozsáhlejší optimalizaci topologie, tvorbu mřížkových struktur (lattice struktur) a mnohé další. Využití aditivních technologií je již nyní patrné hlavně v průmyslových odvětvích jako je letectví, biomedicínské inženýrství, kosmický výzkum nebo i automobilový průmysl.

2.1 Metoda za pomoci spékání práškové vrstvy

Za nejvyspělejší a nyní i komerčně nejvíce využívanou metodu aditivních technologií, pro tvorbu kovových součástí, se považuje spékání práškových vrstev. Specifikum této metody je vrstva prášku nanesená na loži, která je opakovaně vystavená vysokému hustotnímu tepelnému toku, jako pracovní medium většinou slouží laser. Tento tepelný tlak způsobí sintrování případně úplné roztavení kovového prášku. Po ochladnutí se prášek spojí do konsolidované struktury. Při této metodě se nanáší vrstva na vrstvu, a tento proces nakonec vyústí k vytvoření součásti o požadovaném tvaru a daných rozměrech. Z ekonomických i ekologických důvodů je nespečený prášek vysypán, a po odstranění nenatavených částic znovu použit [2].

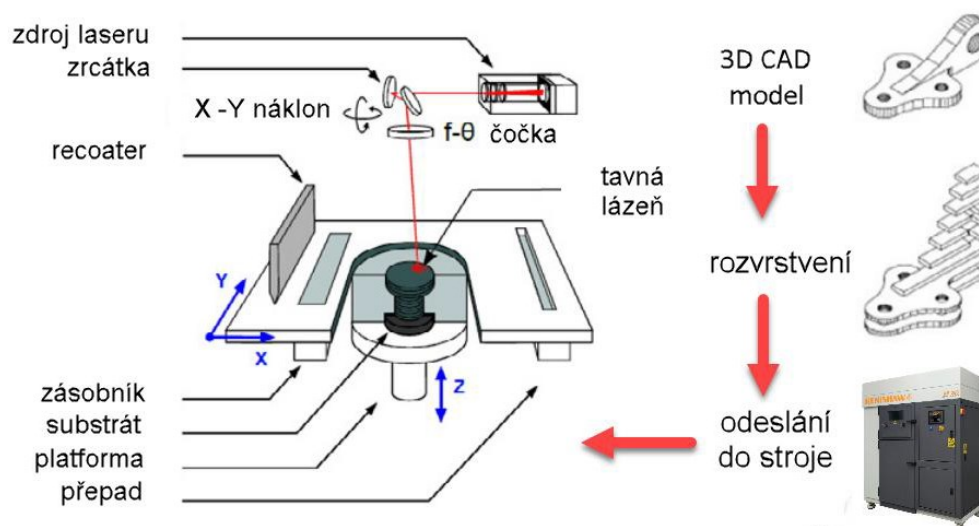
Pro vytvoření tepelného toku se nejčastěji používá selektivní tavení práškového lože pomocí bodového zdroje (fokusovaného laserového paprsku nebo elektronového paprsku) [7]. Pro potřebu rychlé výroby jednotlivých součástí je možné použít technologii vytvrzování (sintrování). Tato metoda již byla zkoumána a zdokonalena pro materiály polymerních prášků [10]. Není však možné použít tuto metodu pro výrobu součástí z kovů, jelikož požadavek na množství vyzařené energie je příliš vysoký [2].

2.2 Princip SLM

Dle vytvořeného CAD souboru, který je laserovým zdrojem rozdělen do vrstev, proběhne skenování práškového pole. Za využití vysoké intenzity laserového paprsku dochází k roztavení a úplnému spojení práškového kovu. Tisk je možný jen s předem vytvořeným 3D objemovým modelem, připraveným v některém z CAD softwarů. Za pomoci dalšího softwaru, který je nejčastěji dodáván výrobcem stroje, je grafický model rozdělen na 2D vrstvy a každá tato vrstva představuje jedno nanesení skutečné vrstvy

kovového prášku. Takto zpracovaný soubor je připraven k odeslání do tiskárny. Tento princip je zobrazen na Obr.3 [2]

Součást se poté tiskne na přehřátý substrát s podobným chemickým složením, jako má právě tisknutý práškový kov. Jakmile je úspěšně natavená vrstva platformy se substrátem, v ose Z se substrát sníží o výšku vrstvy a recoater (wiper nebo čepel) rozhrne prášek v požadované tloušťce vrstvy a laser selektivně nataví další vrstvu [2]. Proces se takto opakuje do té doby, než je vytvořena celá součást. Prášek není mechanicky stlačen, ale lze pozorovat při rozhrnutí typické Gaussovo jednosložkové rozdělení [8].

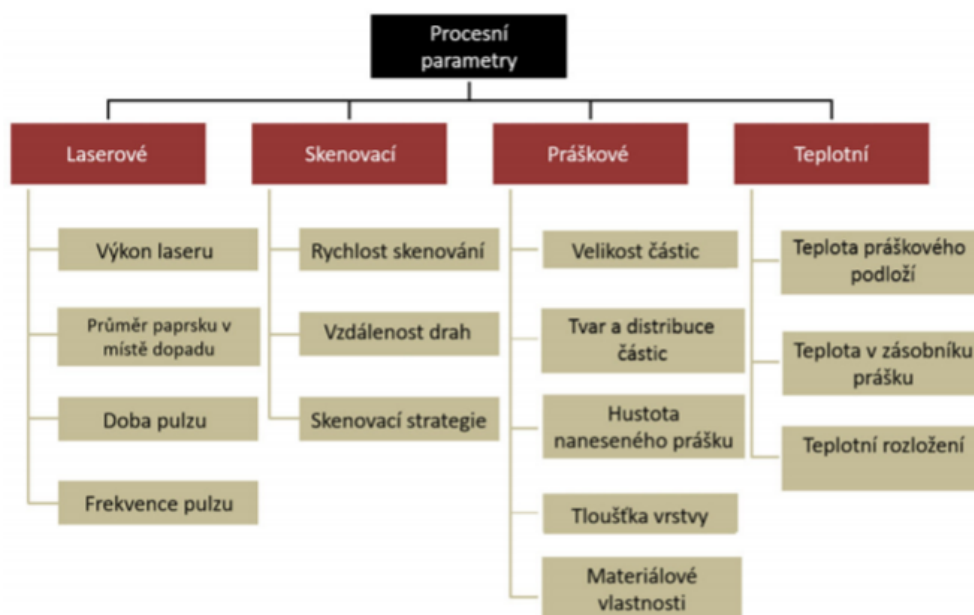


Obr.3 Postup návrhu dílce a princip metody SLM [9]

Z důvodu minimalizování efektu oxidace a možnosti kontaminace z vnějšího prostředí, která by mohla způsobit selhání stavby, se celý proces provádí v inertní atmosféře. Oxidační defekty vznikající při procesu SLM popsal ve své publikaci Simonelli a kol. [11]. Pro naplnění stavební komory inertním plynem se typicky používá argon, který vytlačí koncentraci kyslíku pod hranici 0,1 % bez vytvoření vakua. V průběhu tisku je inertní plyn plynule přiváděn, proudí přes substrát s práškem a neustále přesouvá zbytkový kyslík, a tak nedochází ke vztlaku. Prouděním plynu je navíc odnášen spečený materiál z tavné lázně, který vzniká procesní nestabilitou a je při procesu nežádoucí [11].

2.3 Procesní parametry SLM

Výroba aditivní technologií SLM zahrnuje velké množství fyzikálních interakcí, především tepelných, které ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti. Nejdůležitějšími vlastnostmi výsledné součásti, které chceme příznivě ovlivnit jsou tvrdost, pevnost v tahu, únavová životnost a houževnatost. Tyto vlastnosti se mění s příslušnými procesními parametry, které může základně rozdělit na ty související s laserem, související s rychlostí skenování, související s práškem a související s teplotou. Rozdělení těchto parametrů je zobrazeno na obrázku níže.



Obr.4 Přehled procesních parametrů [6].

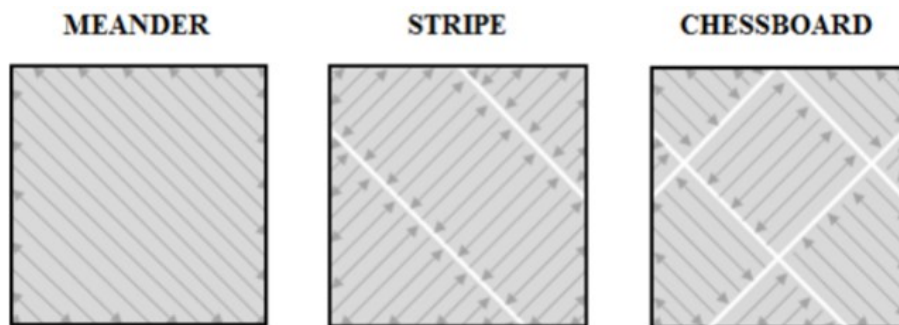
2.3.1 Vliv výkonu a skenovací rychlosti

Zvyšování výkonu laseru dovoluje tavení při vyšších rychlostech a zároveň větší průnik tepla do hloubky. Vyšší výkon laseru příznivě ovlivňuje hodnoty porozity materiálu. Se zvyšující se rychlostí skenování se zkrátí doba ohřevu a tím dochází i ke zmenšování rozptýlení tepla do krajů mimo oblast ohřívané taveniny. Výkon laseru a rychlost jsou na sobě závislé a existuje mezi nimi silná asociace [2]. Laserový paprsek lze záměrně fokusovat a kalibrovat pro dosažení požadovaného průměru paprsku. Nejmenší průměr, který je laser schopen vytvořit, je určen velikostí laserového paprsku (laser spot size). Se snižujícím průměrem bodu se zvyšuje hustota a tím i koncentrace energie. Menší velikost průměru vede k lepší konsolidaci celého dílu, ale nepříznivě zvyšuje dobu stavby [8].

2.3.2 Strategie skenování

Strategie skenování kovového prášku udává, jakou dráhou laserového paprsku bude tvořená dvourozměrná plocha jedné vrstvy součásti. Volba dané strategie ovlivňuje především zbytková napětí, která vznikají jako důsledek rychlého ohřevu a následného ochlazení natavených částic v rámci výrobního procesu. Tímto termickým procesem vzniká mezi jednotlivými vrstvami zbytkové napětí [8]. Vhodná volba skenovací strategie tedy může zabránit případnému porušení součásti jakožto následku vnitřního pnutí. Dále různé strategie ovlivňují další vlastnosti výsledného výrobku jako jsou hustota mikrostruktury nebo pórovitost [12].

Jednotlivé strategie jsou voleny na základě geometrie vyráběné součásti a také se zohledněním její velikosti. Nejběžnější strategie jsou zobrazeny na Obr.5.



Obr.5 Skenovací strategie [5]

Charakteristiky skenovacích strategií:

Meander – Vektory směru laserového paprsku jsou mezi sebou paralelní a skenování probíhá jedním kontinuálním směrem [2]. Strategie Meander je vhodná především pro tenkostěnné součásti o malých rozměrech, kde skenovací vektory nedosahují velkých délek [5].

Stripe (pruhy) – Podobná strategie jako Meander, rozdílem je však, že plocha je rozdělaná na jednotlivé pruhy. Strategie se vyznačuje homogenním rozmístěním zbytkových napětí a vyšší rychlosti stavění. Vhodná je pro větší a objemnější dílce [5].

Chessboard (šachovnice) – Principem je rozdělení plochy na jednotlivé pole o určité velikosti. Každé pole je oproti sousedícímu pootočeno o úhel 90° . Tato strategie byla vyvinuta speciálně pro snížení zbytkových napětí. Toho je dosaženo rovnoměrným rozložením zbytkového namáhání, protože dochází k výraznému zkrácení skenovacích vektorů. K omezení vzniku porosity je nutné správně nastavit rozteč mezi jednotlivými poli. [5,2]

Jednotlivé procesní parametry, jako síla laseru a rychlost snímání, musí být optimalizovány pro danou strategii.

3. Dokončovací operace

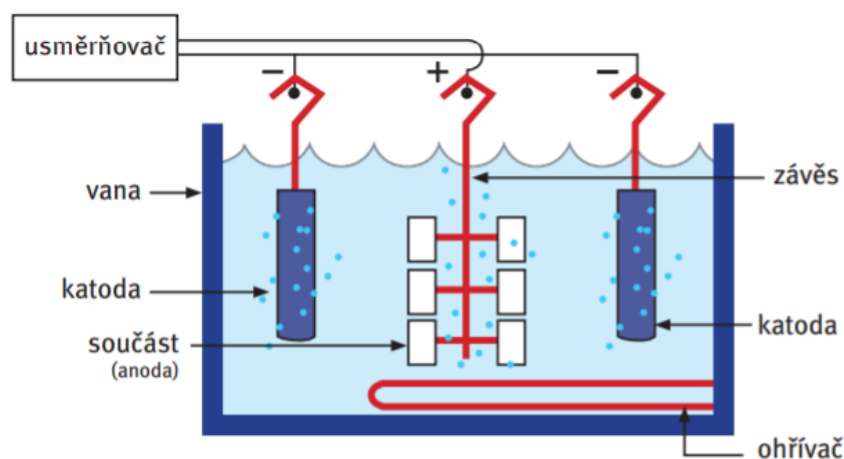
Pro složitost vnitřních lattice struktur, není možné upravit povrchy vzpěr (prutů) konvenčními metodami jako jsou obrábění nebo mechanické leštění. Je tedy potřeba použít metod bez většího přispění mechanických sil. Cílem bakalářské práce je tedy provést několik nekonvenčních dokončujících operací na lattice strukturách zhotovených 3D tiskem a následně je porovnat a zhodnotit. Nekonvenčními metodami je myšleno leštění pomocí plazmy, speciální druh protlačovacího honování abrazivním médiem (nakonec z ekonomických důvodů nebylo v práci použito) a leštění elektrochemické. Na připravených vzorcích bude provedeno i mechanické otryskání od kterého se však očekávají nejhorší výsledky. Principy jednotlivých metod jsou popsány níže v této kapitole.

3.1 Elektrochemické leštění

Elektrochemické leštění, nebo také elektrolytické leštění, je metodou povrchové úpravy chemickou cestou, při které se z povrchu předmětu z kovového materiálu odebírá kov ve formě iontů. Cílem této technologie je minimalizovat mikroskopickou drsnost povrchu a tím omezit ulpívání nečistot na povrchu součástí. Při elektrolytickém leštění nedochází k mechanickému, tepelnému ani chemickému ovlivnění materiálu, lze jím tedy upravovat i malé a křehké součásti.

3.1.1 Princip metody elektrochemického leštění

Při elektrolytickém leštění je odebírán kov z povrchu součástí, ponořené do elektrolytu za pomoci účinku procházejícího elektrického proudu. Ve své podstatě se jedná o opak galvanického pokovování. Při leštění odebíráný kov přechází do roztoku ve formě iontů. Proces se provádí ve vaně naplněné elektrolytem. Vana je většinou zhotovená z plastu nebo je vyložená olovem. Do lázně je spuštěno několik ocelových, olověných nebo měděných desek, které jsou připojeny na záporný pól elektrického zdroje. Opracovávaná součást je uchycena na titanové, měděné nebo bronzové závěsy, které jsou připojené na opačný, kladný pól zdroje [4]. Tím se upravované kusy stávají anodou. V elektrolytu tedy vzniká uzavřený elektrický obvod. Obvodem prochází stejnosměrný proud. Elektrolyt se chová jako elektrický vodič, který umožňuje odebírání iontů kovu z povrchu součástí. Ionty jsou přitahovány ke katodě, ale většina rozpuštěných kovů zůstává v roztoku. Lázeň používaná pro elektrolytické leštění obsahuje stejně velké objemy kyseliny sírové koncentrace 96 hm.% a kyseliny ortofosforečné koncentrace 85 % [4]. Princip zařízení pro elektrochemické leštění je znázorněn na Obr.6. Proudová hustota se volí ve většině případů $5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ až $25 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$, teplota v rozmezí 40°C – 75°C . Pracovní podmínky je třeba správně optimalizovat, aby při procesu odebírání kovů nedošlo k porušení rozměrové tolerance. Jako materiál pro katody se používá korozivzdorná ocel, měď nebo olovo. Na katodách vzniká nežádoucí kal, který je potřeba čistit, aby neklesala účinnost pochodu [4].



Obr.6 Zařízení pro elektrolytické leštění [4]

Množství odebíraného kovu z povrchu anody je úměrné intenzitě procházejícího proudu, dále účinnosti použitého elektrolytu a době trvání procesu. Jako první jsou vyhlazeny místa ostrin, otřepů a výstupků na povrchu, kde dochází k vysokým proudovým hustotám. Při elektrolytickém leštění nedochází k mechanickému ani tepelnému ovlivnění žádným brusivem, nedochází k narážení žádných částic a součásti se nepřevalují v žádných bubnech, jako je tomu často u mechanických dokončovacích operací [4].

3.1.2 Předúprava kovového povrchu

Správná a důsledná předúprava povrchu leštěného materiálu je potřebná pro dosažení co nejlepšího výsledného kovového reliéfu. Předúprava se provádí ve dvou krocích a to: alkalické čištění a odmaštění v rozpouštědle a následné moření [4]. Čištěním v alkalických roztocích nebo v rozpouštědlech se odstraní veškeré mastnoty, jako jsou zbytky olejů, vazelin, otisků prstů a podobné nečistoty vzniklé při výrobě. Základní složky odmašťujících lázní se zpravidla skládají ze směsi anorganických látek alkalických hydroxidů, křemičitanů a metakřemičitanů, fosforečnanů a polyfosforečnanů, boritanů a uhličitanů [13]. Po alkalickém čištění následuje moření v roztocích se silnými kyselinami jako je kyselina chlorovodíková nebo kyselina dusičná. Výsledkem moření je odstranění zbytků oxidů a také odstranění alkalické vrstvičky vzniklé čištěním. Po těchto úpravách následuje oplach a vysušení kovu.

Elektrolytické leštění se uplatňuje v průmyslech, kde je vysoký požadavek na povrch o vysoké kvalitě. Jde o výrobky používané v lékařství, jako jsou skalpely, svorky anebo tělní implantáty. Dále lze využít i v chemickém a potravinovém průmyslu. Výhodou kvalitních povrchů je jejich snadné čištění a nízké riziko kontaminace. Kromě funkčních vlastností, má takto leštěný povrch i pěkný kovový lesk, tudíž i plný i designový účel.

3.2 Leštění pomocí plazmy

Z ekologického, technologického i hygienického hlediska je vhodnou alternativou elektrochemického leštění technologie plazmového leštění kovových povrchů. Podstatou

této technologie, nazývané také jako leptání povrchu plazmou, je odstraňování látek z povrchu ošetřovaného vzorku za účelem vytvoření reliéfu. Tato metoda je založená na procesu, který je možné charakterizovat čistě jako fyzikální. Technologie využívá účinek elektrických výbojů na kovový povrch, který je ponořený do vodivého prostředí – elektrolytu. Výboje probíhají v tenké vrstvě par a plynů obklopujících leštěný povrch – toto prostředí se nazývá paroplazmová obálka. Mikroskopické otřepy a nárůstky na povrchu se následkem výboje vypaří a odstraněný kov přechází do roztoku ve formě kyslíčků, tvořících kal. Dochází k rapidnímu snižování drsnosti povrchu, snižování množství povrchových defektů materiálu i k odstraňování různých nečistot z leštěného povrchu. Vodivé prostředí je tvořeno nízko koncentrovanými roztoky soli (5-6 %) o neutrálním charakteru. Nepoužívají se žádné toxické látky [16].

3.2.1 Vznik paroplazmové obálky

Ze základních informací z fyziky je známo, že v elektricky vodivých kapalinách se v důsledku elektrolytické disociace některé molekuly štěpí. Částice vzniklé štěpením mají elektrický náboj a jsou v roztoku volně pohyblivé. Pokud jsou do takového roztoku vloženy dvě elektrody připojené ke zdroji stejnosměrného proudu, vznikne v roztoku elektrické pole, které vyvolává usměrněný pohyb nabitých iontů [16].

Z Ohmova zákon pro elektrolyty a vyplývá, že hustota elektrického proudu v elektrolytu je úměrná intenzitě elektrického pole, které elektrický proud vyvolává. Zákon platí jen v případě, že pohyblivost iontů je konstantní, což platí při napětích a proudových hustotách běžných v klasické elektrochemii. Při vysoké intenzitě elektrického pole anebo při vysoké hustotě elektrického proudu se poruší lineární vztah mezi intenzitou pole a hustotou elektrického proudu v důsledku brzdění iontů ostatními ionty opačného potenciálu. Tato situace nastane i v případě, že jedna z elektrod bude mít výrazně menší plochu povrchu než druhá. Menší elektroda se označuje jako aktivní elektroda [16]. Pro absolutní hodnotu elektrického proudu procházejícím obvodem platí:

$$J = \frac{i_K}{S_K} = \frac{i_A}{S_A} [A \cdot mm^{-2}] \quad (3.1)$$

kde:

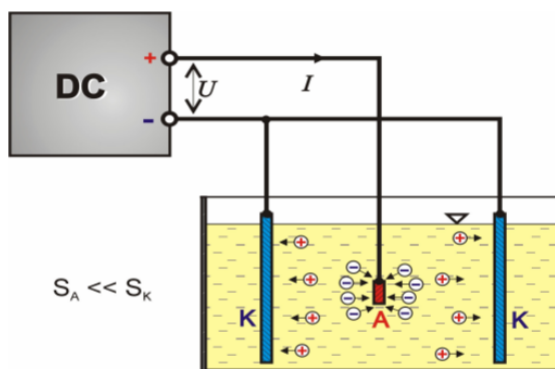
J – proudová hustota [$A \cdot mm^{-2}$]

i_K a i_A – elektrický proud na katodě a anodě [A]

S_K a S_A – plocha katody a anody [mm]

Na Obr. 7 je anoda výrazně menší než katoda. Je tedy zřejmé, že proudová hustota na anodě bude podstatně vyšší než na katodě. V okolí katody bude klesat pohyblivost iontů v důsledku brzdění ionty opačného znaménka, což má za důsledek reálný pokles měrné vodivosti elektrolytu v blízkém okolí anody. Zvyšováním napětí na elektrodách se zvyšuje

intenzita elektrického pole mezi elektrodami. Tím se efekt brždění nosičů náboje zvětší a vodivost elektrolytu v okolí anody dále klesá. Přejedem elektrického proudu přes elektrický okruh vznikají na jednotlivých částech okruhu úbytky napětí v závislosti na elektrické vodivosti jednotlivých částí. Elektrická energie přechází v Joulové teplo [16].



Obr.7 Přenos iontů v elektrolytu při rozdílné ploše povrchu elektrod [16].

Měrný elektrický odpor běžných kovů a jejich slitin je podstatně menší než odpor, který vykazuje jejich elektrolyt. To je způsobené malou pohyblivostí aniontů a kationtů v kapalině. V oblasti aktivní elektrody klesá lokální měrná vodivost elektrolytu následkem efektu brždění nosičů náboje. V těchto místech roste úbytek napětí, a právě proto se v této oblasti uvolňuje nejvíce Joulového tepla. Nad povrchem aktivní elektrody se začne elektrolyt intenzivně ohřívat. Zvyšováním napětí na elektrodách se proces zintenzifikuje: narůstá hustota elektrického proudu, klesá reálná vodivost elektrolytu v okolí aktivní elektrody, narůstá počet plynových bublinek jakožto důsledek intenzivní elektrolýzy a zvyšuje se teplota elektrolytu nad povrchem aktivní elektrody. Uvedený proces může nastat jen při nízké vodivosti elektrolytu. Teplo na rozhraní elektrolytu a aktivní elektrody prostupuje do okolitého elektrolytu [16].

Teplotní gradient v objemu elektrolytu ve směru k rozhraní je malý, rozdíly teploty nejsou velké. Teplota začíná prudce stoupat až v těsné blízkosti rozhraní. Na rozhraní vzniká teplotní mezní vrstva – tenká vrstva v elektrolytu s výrazným teplotním spádem, kde teplota prudce klesá z teploty T_A na hodnotu blízkou teplotě T_E . Ohřátý elektrolyt se v mezní vrstvě stává lehčím a vyvolává oproti svému okolí tlak, což vede k proudění této vrstvy směrem vzhůru. Intenzita tohoto proudění závisí především na teplotním spádu v mezní vrstvě a na součiniteli tepelné roztažnosti elektrolytu. Jestliže je teplota na rozhraní elektrolyt-aktivní elektroda vyšší, než je teplota syté páry (při daném tlaku), začne probíhat var elektrolytu. Var elektrolytu je provázený vznikem bublin, které rostou a odtrhávají se z povrchu aktivní elektrody. Parní bubliny vznikají opakovaně na určitých místech výhřevné plochy v tzv. parných jádrech. Intenzita varu elektrolytu závisí na počtu aktivních parných jader a na frekvenci vzniku a odtrhnutí parných bublin z jader. Tyto faktory závisí na přehřátí elektrolytu nad povrchem aktivní elektrody [16].

Zvyšování napětí na elektrodách vede k dalšímu zvýšení přehřátí elektrolytu nad povrchem aktivní elektrody. Větší přehřátí vede k aktivaci dalších parných jader o menších rozměrech a zvětšuje frekvenci tvoření bublinek. Po překročení přehřátí nad hodnotu bodu největší intenzity přehřátí nastane slítí bublin do blány. Tvořící se blána je nestabilní a trhá se. Stabilní blánový var nastane až při ještě větším přehřátí. Po tom, co se povrch aktivní elektrody pokryje souvislou vrstvou parní blány, není nadále aktivní elektroda v kontaktu s elektrolytem, což znamená pokles elektrického proudu na nulu. Elektrický okruh je přerušen, zaniká zdroj tepla na rozhraní aktivní elektroda-elektrolyt a přehřátí elektrolytu postupně klesá. Po určitém čase se kvůli gravitaci a tlakovým silám poruší celistvost blány a dochází k obnovení elektrického kontaktu mezi elektrolytem a aktivní elektrodou. Opět narůstá přehřátí elektrolytu nad aktivní elektrodou, obnoví se tvorba parných bublin – po čase bublinový var přechází do blánového. Celý proces se cyklicky opakuje, nastává kmitání elektrického proudu [16].

Vytvořením stabilní ionizované parní blány nad povrchem aktivní elektrody vzniká soustava kov-elektrolyt-plyn-kov. V plynném prostředí ionizované parní blány se nachází ionty, elektrony a neutrální molekuly, t.j. plazma. Ionizovanou parní blánu okolo aktivní elektrody označujeme jako paroplazmovou obálku [16].

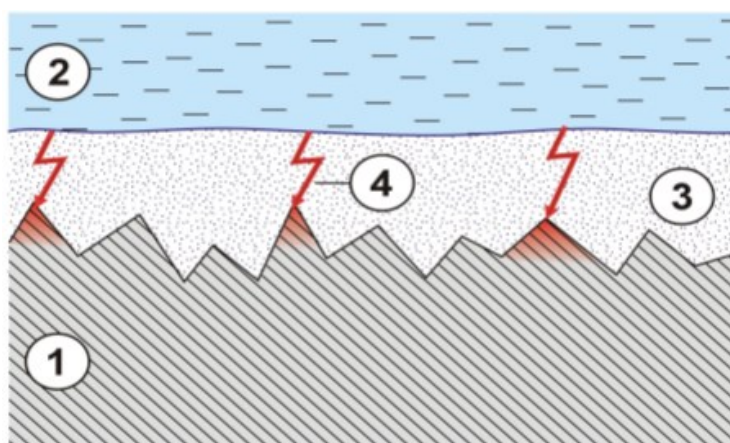
Na základě výše uvedených informací je možné konstatovat, že pro vznik paroplazmové obálky na povrchu leštěného objektu, ponořeného do elektrolytu musí platit tyto podmínky:

- Aktivní elektrody (leštěný objekt), musí mít výrazně menší plochu než pomocná katoda.
- Napětí na elektrodách elektrolytického obvodu musí být dostatečně vysoké na to, aby nastala ionizace tenké vrstvy par a plynů, která se tvoří okolo aktivní elektrody [16].

3.2.2 Mechanismus vyhlazování povrchového reliéfu

Charakter dopadu fyzikálních účinků elektrolyticko-plazmového procesu na upravovaný povrch určují elektrostatické síly vyvolané vysokou intenzitou elektrického pole v tenké vrstvě paroplazmové obálky, ale také elektromagnetické síly vyvolané průtokem proudu elektricky nehomogenním prostředím. Interakcí mezi elektrickým proudem, který protéká přes paroplazmovou obálku a vybuzeným magnetickým polem se generují tzv. Lorenzovy síly působící na vodivé složky paroplazmové obálky. Tyto síly způsobují shlukování nosičů elektrického náboje do úzkých sloupců s vysokou vodivostí (pinch efekt). Vzhledem ke značné heterogenitě prostředí paroplazmové obálky vyvolávají tyto síly taktéž pohyb těchto sloupců ve směru kolmo na kovový povrch, přičemž rychlost je zvyšována vznikajícími magnetohydrodynamickými silami. Úzké sloupce výboje s bodovým kontaktem s kovovou elektrodou fungují jako pohybující se bodové zdroje tepla, které odpařují vyvýšené části povrchového reliéfu, kde je vzdálenost mezi kovovým povrchem a protilehlou elektrodou – stěnou elektrolytu, nejmenší [16].

Elektrický výboj mezi kovovou a kapalnou elektrodou nemá plošný charakter, ale elektrický proud přechází přes úzké ionizované kanálky v místech, kde je tloušťka paroplazmové obálky nejmenší. Elektrický výboj probíhá lokálně, přednostně nad vyvýšenými místy povrchového reliéfu, které zároveň fungují jako koncentrátoři napětí. Kov se na těchto místech působením výboje okamžitě odpařuje, čímž se zvýší vzdálenost mezi elektrodami a výboj se přesouvá na další lokalitu s vyšší intenzitou elektrického pole, tj. na nejbližší „výčnělek“ povrchového reliéfu. Uvedený děj má dynamický charakter – úzké ionizované kanálky, kterými prochází elektrický proud přes plynné prostředí paroplazmové obálky, se neustále pohybují po leštěném povrchu a odpařují vyvýšená místa povrchového reliéfu [16]. Tento princip je zobrazen na obrázku níže.



*Obr.8 Mechanismus vyhlazování povrchu výboji v elektrolytu [16];
1 – leštěný povrch (anoda), 2 – elektrolyt, 3 – paroplazmová obálka, 4 – ionizovaný kanálek (výboj)*

Dle již dříve provedených experimentů bylo zjištěno, že kovový lesk nesouvisí přímo se snižováním drsnosti. Při vizuální kontrole vzorků bylo zjištěno, že největší lesk nevykazují vzorky s nejmenší povrchovou drsností [16].

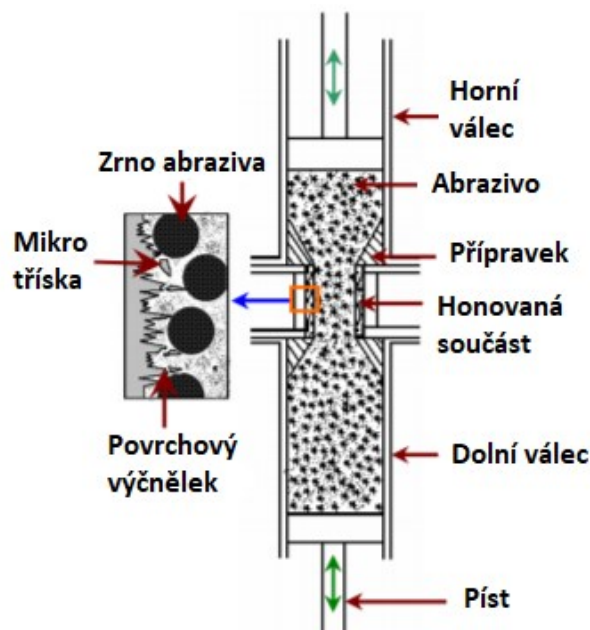
3.3 Protlačovací honování AFM

„Abrasive flow machining“ je možné volně přeložit jako obrábění proudícím abrazivem nebo, z hlediska současného využití, také jako honování za pomoci proudícího média. Jedná se o dokončovací proces, který využívá průtok leštícího média k opracování povrchu součástí. Jako nástroj zde funguje leštící médium, které kontaktně protéká přes součást a mechanicky odebrává nerovnosti na povrchu součásti. AFM se využívá pro leštění, odjehlení a k zarovnání hran především u součástí se složitější geometrií a s vysokým požadavkem na povrchovou drsnost. Historie této nekonvenční technologie honování, začala jakožto vynález pro dosažení kvalitnějšího proudění kapalin a plynů v kritických místech konstrukcí kosmických a leteckých systémů pro rozvod paliva a hydraulických kapalin [14]. Tato technologie je tedy poměrně novinkou na trhu ale již nyní je považovaná za jednu z cenově

nejvýhodnějších na vlastní provoz. Problémem je však její nedostupnost v ČR. AMF se v současné době využívá například pro letecký a automobilový průmysl nebo k výrobě polovodičů.

3.3.1 Technologie AFM

Z hlediska použití se definují čtyři hlavní metody, a to jednosměrné (one-way) AFM, obousměrné (two-way) AFM (viz Obr.9), multi-flow AFM a orbitální AFM. Tato bakalářská práce se zabývá pouze obousměrným AFM. Hlavním principem obousměrného honování AFM je mechanismus, kde dva vertikálně protichůdné písty protlačují médium tam a zpět skrze mezery, které vznikly mezi leštěným dílcem a přípravkem. Tloušťka odebrané vrstvy se obvykle pohybuje od 1 do 10 μm . Při procesu AFM dochází k odhroťování, zaoblování a leštění současně při jedné operaci a zároveň jsou odstraněny i nerovnosti v těžko přístupných polohách. Na odlévaných a obráběných součástech AFM snižuje drsnost povrchu o 75 až 90 %. Při jednom záběru pístu lze opracovat desítky otvorů nebo několik průchodových míst se stejnými výsledky. Počet operací se opakuje tak dlouho, dokud se nedosáhne požadované drsnosti nebo požadovaných výsledků. Písty, které stlačují médium jsou poháněny hydraulicky nebo mechanicky. Dokonalého vyleštění prohlubní, výklenků a dutin lze dosáhnout použitím různých omezovačů nebo trnů tak, aby honovací médium procházelo přes vybraná místa [17]. Využití se nenabízí jen pro vnitřní hrany a povrchy ale pro povrchy vnější, napří při leštění zubů ozubených kol [14]. Míru obroušení tedy ovlivňuje design přípravku ale také pracovní parametry jako tlak, kterým je médium stlačováno, průtok média a stejně tak i parametry honovacího média, především jeho viskozita a pracovní teplota. Všechny tyto parametry ovlivňují počet abrazivních částic působících na obráběnou součást a také sílu, která působí na jednotlivá zrna. Větší průtok způsobí nárůst interakce mezi abrazivním zrnem a leštěným dílcem [17].



Obr. 9 Princip oboustranného protlačovacího honování AFM [17]

3.3.2 Honovací médium

Médium použité pro přenos abrasiva, hraje zásadní roli v technologii AFM, protože musí zaručit dobré leštící podmínky a zároveň vykazovat správnou hustotu a viskozitu. Médium se skládá ze dvou hlavních prvků, a to z polotekutého nosiče a z pevných abrazivních částic, které fungují ve své podstatě jako řezný nástroj odstraňující materiál ze součásti. Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti média mají velký vliv na pracovní proces AFM. Nejčastěji používané jsou honovací pasty nebo polymerní gely.

Polymerní gely jsou trojrozměrné (3D) sítě složené z molekul polymerů a rozpouštědla, které vyplňuje intersticiální prostory a poskytuje schopnost podrobit se deformaci. Při tvorbě těchto gelů se pevné polymerní řetězce v kapalně matrici nerozpouštějí, ale bobtnají. Tím je dosaženo dobrých viskoelastických vlastností [3]. Nejběžnější polymery, používané pro leštění jsou polyborosiloxan [22] nebo silikonová guma a jako abrazivum se používá karbid křemíku, oxid hlinitý, karbid boru nebo polykrystalický diamant [24]. Velikost brousícího abrasiva se pohybuje od 5 do 4 000 μm . Obměnou různých složení a změnou poměrů mezi látkami, lze snadno měnit zásadní vlastnosti, jako je viskozita nebo tuhost abrasiva a to od řídkých přes pastovité až po vysoce viskózní těstovité hmoty [14]. Správně vytvořený polymerní gel by měl pro abrazivní částice vytvořit dostatečnou podporu a zároveň jim umožnit co nejlepší recirkulaci [20]. Technický vývoj polymerních gelů se stále zdokonaluje a přesná formule těchto médií je často tajemstvím průmyslových společností, které se jejich výrobou zabývají. Ukázkové fotky honovacích médií jsou zobrazeny na Obr. 10 a Obr. 11.



Obr.10 Polymerní gel firmy Extrude Hone AFM, USA. [20]



Obr.11 Silikonový materiál bez abraziva (vlevo), honovací médium s abrazivními částicemi. [23]

3.4 Tryskání

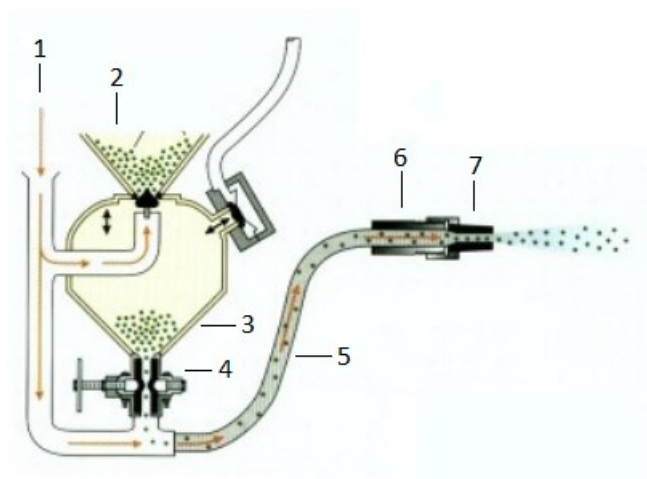
Přesná definice tryskání dle normy ČSN 8501-01 zní: „Tryskání je úprava povrchu tryskacími prostředky, které jsou vrhány na upravenou plochu. Tryskací prostředek je nástroj, který má charakter pevné látky nebo kapaliny, případně jejich směsi. Při dopadu tryskacího prostředku na otryskávaný povrch dochází k odstranění nečistot základního materiálu a dále k plastické deformaci v povrchové vrstvě.“ [18]

Technologie tryskání je jedna z nejpoužívanějších metod úprav povrchu. Jedná se o technologický postup, kterým se opracovává povrch materiálu proudem jemných částic, které jsou urychlovány různými způsoby (stlačeným vzduchem, metacími koly nebo kombinací tlaku vzduchu a vody). Takto urychlené tryskací prostředky dopadají na upravovaný povrch s danou mírou kinetické energie, s určitou vzdáleností a pod určitým úhlem. Podle tvaru, velikosti a tvrdosti abrazivních částic vykonávají potřebnou práci [25, 26]. Tato úprava může být velmi jemná anebo naopak povrch může být po této operaci velice zdrsňen. Při úpravě povrchu se využívá kinetické (pohybové) energie tryskacího prostředku. Při dopadu abraziva na povrch dochází nejen k odstranění nečistot a ke změně drsnosti materiálu, ale také k plastické deformaci na povrchové vrstvě materiálu. Výsledný povrch má tudíž i jiné mechanické vlastnosti než před tryskáním. Míra očištění a zpevnění materiálu dílce je ovlivňována volitelnými parametry, a to především rychlostí abraziva, intenzitou tryskání, úhlem dopadu a tvrdostí abraziva, a dále je třeba zhodnotit i tvrdost tryskaného dílu [30].

3.4.1 Pneumatické tryskání

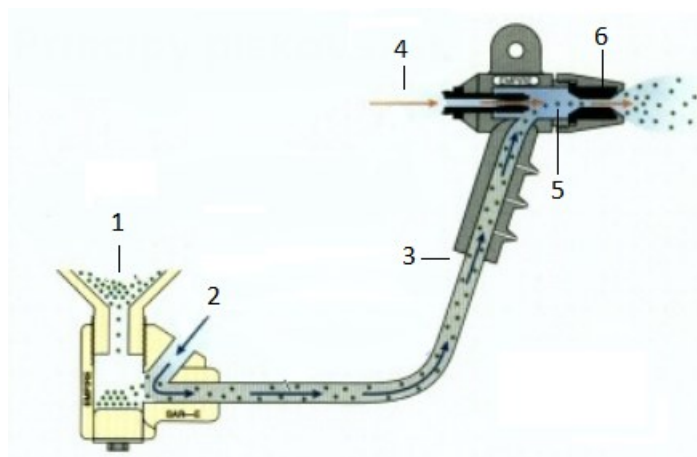
Při pneumatickém tryskání dochází k dopravování a urychlování tryskacích prostředků proudem stlačeného vzduchu. Při tlakovzdušném tryskání se tlak vzduchu pohybuje většinou v rozsahu 0,2 – 0,8 MPa. Na povrch otryskávaného předmětu je směs abrazivních částic a stlačeného vzduchu vrhána za pomoci trysky. Stroje pro tryskání mohou být malé jednoduché pistole, které umožňují například tryskání v terénu, ale existují i speciální tryskací komory s automatickým naváděním trysek [18]. Dle způsobu konstrukce lze pneumatické systémy rozdělit na:

Tlakové tryskání – součástí zařízení je tlaková nádoba, která obsahuje tryskací prostředek – abrazivo. Abrazivo je se stlačeným vzduchem smícháno již v tlakové nádobě. Po otevření ventilu je z této nádoby abrazivo vedeno vzdornou hadicí, ve které již částice tryskají vysokou rychlostí, než se dostanou k trysce. Tryska umožní ještě větší tlak a efektivitu tryskání. Do tlakové nádoby je třeba nasypat příslušné množství tryskacího prostředku a po jeho spotřebování tlakovou nádobu opět doplnit. Tlakovým tryskáním se dosahuje vysoké intenzity, a proto je vhodné k čištění kovů od mechanických nečistot, odstraňování barev, korozních produktů, okují a k zpevňování povrchové vrstvy materiálu. [29,18]. Princip tlakové tryskání je zobrazen na Obr.12.



Obr.12 Princip tlakového tryskání; 1 – přívod stlačeného vzduchu, 2 – tryskací prostředek, 3 – tlaková nádoba, 4 – uzavírací ventil, 5 – přívodní hadice tryskací směsi, 6 – držák trysky, 7 – tryska [29].

Injektorové tryskání – u tohoto způsobu konstrukce je stlačený vzduch přiveden do směšovací komory s urychlením skrze vnitřní vzduchovou trysku směrem k výstupní trysce. Toto urychlení vyvolává podtlak, a druhým přívodem je tak do proudu vzduchu nasáván tryskací prostředek. Optimalizace intenzity tryskání je možná skrze změnu průměru trysky nebo velikostí tlaku. Po dopadu abraziva na opracovávaný předmět se abrazivum odrazí a ze dna kabiny je opět přisáván do pistole, tudíž odpadá nutnost doplňování tryskacího prostředku a přerušování pracovního cyklu [29,18]. Princip injektorového tryskání je zobrazen na Obr. 13.



Obr. 13 Princip injektorového tryskání; 1 – zásobní nádoba, 2 – přisávání vzduchu s regulací, 3 – přívod tryskacího prostředku, 4 – přívod stlačeného vzduchu, 5 – směšovací komora, 6 – pracovní tryska [29]

3.4.2 Tryskací prostředky

Abrazivní částice fungují při technologii tryskání jako nástroje a volba správného druhu je tak pro celý proces kritická. Kromě nastavení pracovních parametrů, mají tryskací prostředky největší vliv na výsledek povrchu a povrchové vrstvy očišťované součásti. Volba abraziva závisí na vlastnostech tryskaného materiálu, na použitém zařízení a hlavním účelu tryskání. U abraziv se zohledňuje jejich tvar a materiál. Co se týče materiálu abrazivních částic, důraz se klade na mechanické vlastnosti, zejména tvrdost, a potom je třeba vzít v potaz i jeho chemické složení.

Tvar zvoleného abraziva se po dopadu na povrch dílce vtiskne do materiálu, a tím vytvoří charakteristický vzhled povrchu. Houževnaté materiály mají sklon se během tryskání zakulacovat, což pomáhá k prodloužení jejich životnosti. Naopak křehčí materiály se štípou nebo lámou na menší kusy (to znamená, že po krátké době nevyhovují výchozím požadavkům), jejich abrazivní účinek však zůstává zachován. Po otryskání vzniká u některých abraziv tzv. sekundární znečištění, které je tvořené zbytky tryskacích prostředků. Ve většině situací toto znečištění negativně ovlivňuje přilnutí dále nanášených povlaků a lepidel. V případě použití železných materiálů mohou být zbytkové nečistoty iniciátory tzv. bleskové koroze. Jedná se o tenkou vrstvu oxidů železa, která se musí před dalšími procesy odstranit. Sekundární znečištění je žádoucí v případě použití abraziva vyrobeného z neželezných kovů. Během tryskání dochází k zachytávání abraziva na tryskaný povrch, tím je docíleno dočasné ochrany proti korozi – např. zinkový sekaný drát. Žádné sekundární znečištění nezanechává např. suchý led [30,18]. Základní přehled dohledatelných materiálů pro abrazivní částice je uveden v následující Tabulce 1.

Tab.1 Přehled používaného abraziva [18,31]

Železné materiály	Uhlíková ocel
	Korozivzdorná ocel
	Litina
Neželezné kovové materiály	Hliník
	Bronz
	Zinek
	Mosaz
Anorganické nekovové materiály	Keramika
	Korund
	Karbid křemíku
	Sklo
	Suchý led
	Skleněné kuličky
Organické materiály	Směs plastů
	Skořápky ořechů
	Písek
	Ovocné pecky
	Tvrdé dřevo
	Rýžové slupky
	Zirkon
	Drcené ulity korýšů
	Granát

Hnědý korund – jedno z nejtvrdších známých abraziv. Je možné jím brousit všechny technické materiály kromě diamantu. Jiným názvem také (Al_2O_3). Je zhotoven pálením bauxitu v indukčních pecích při teplotách okolo 1600 °C. Poté se drtí a kontroluje se množství obsaženého Al_2O_3 . Dělí se dle zrnitosti s označením F-24, F-36, F-45 apod. Velikost zrna bývá v hodnotách od setin milimetrů do několika milimetrů. Hnědý korund je velmi odolný a má vysokou životnost zrna. Má univerzální použití. Fotografie hnědého korundu je zobrazena na Obr. 14.



Obr.14 Hnědý korund [70]

Ocelový granulát (ocelové kuličky) – Kulatý ocelový granulát je vyráběn z nadeutektoidní upravené oceli. Má pouze jemnou homogenní strukturu temperovaného martenzitu, tudíž vykazuje optimální odrazovou pružnost a odolnost proti únavě materiálu. Vlastnosti tohoto výrobku, především jeho životnost a odolnost proti rázům, umožňují maximální čistící účinek při optimálních nákladech. Tryskání ocelovým granulátem často doprovází technologie slévání a svařování. Příliš se však nehodí na hliník a na jiné měkké materiály. Použitím tohoto prostředku můžeme docílit i zvýšení povrchové tvrdosti [34,28]. Ocelový granulát je zobrazen na Obr. 15.



Obr.15 Ocelový granulát [71]

4. Drsnost povrchu a jeho měření

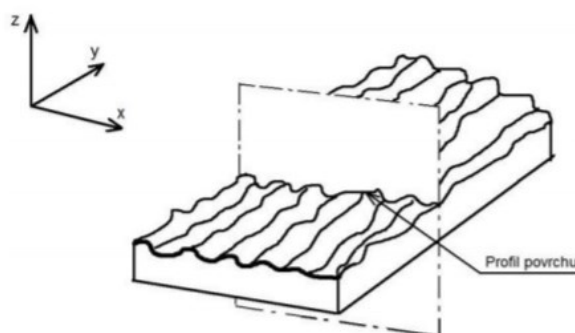
Jakákoli technická metoda, používaná ke zhotovení ploch po sobě zanechává nerovnosti, které mají zásadní význam na funkci těchto ploch. Již dlouho je ve strojírenském průmyslu kladen důraz na dobrou kvalitu povrchu součástí. Správná jakost povrchu je důležitá jak pro funkčnost součástí, na stykových i nestykových plochách, ale taktéž pro design výrobku a jeho líbivý vzhled, který je dnes na trhu jedním z požadavků. Je třeba rozeznat od sebe nedokonalosti povrchu (náhodné vady, které se nezahrnují do struktury povrchu, např. mikrotrhliny, rýhy nebo koroze) a strukturu povrchu, což vyžaduje trojrozměrné opakované odchylky od ideálního (dokonale hladkého) povrchu [33].

Nejčastěji se ve strojírenské praxi hodnotí struktura povrchu podle tzv. drsnosti povrchu. Drsnost povrchu je definovaná jako souhrn nerovností povrchu s relativně malými vzdálenostmi vznikající jako důsledek použité technologie výroby. Drsnost nelze přesně charakterizovat jedním parametrem, ale existuje celá škála parametrů, které tento pojem popisují. Jedná se o parametry popisující profily povrchu, popřípadě trojrozměrné plochy povrchu dle normy ČSN EN ISO 4287 [35].

4.1 Parametry profilu povrchové drsnosti

Abychom byli schopni mezi sebou porovnávat různé kvalitní povrchy je důležité definovat hodnoty drsnosti. Dle platných norem ISO a DIN, můžeme naměřené hodnoty vyhodnocovat. Je třeba rozumět, jak jsou definované jednotlivé hodnoty a jak je na měřeném vzorku poznáme. Uvádím krátký výpis pojmů potřebných k vyhodnocování vytisknutých vzorků.

Profil povrchu – křivka vzniklá jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny. Rovina je kolmá k měřenému povrchu. Podle normy je souřadnicový systém profilu takový, že osy X a Y leží na povrchu skutečném a osa Z směřuje ven z materiálu (viz Obr. 16). Profil povrchu se rozděluje na prvky, kde každý prvek je tvořen jedním výstupkem (část profilu směřující ven z materiálu, tzn. kladné hodnoty na ose Z) a přilehlou prohlubní (část směřující do materiálu) [35,40].

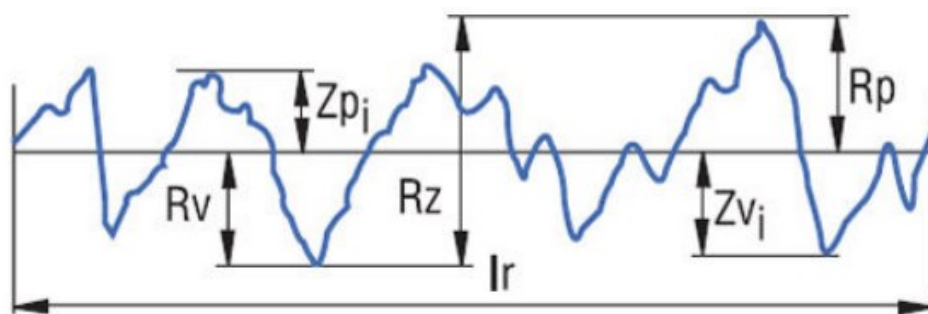


Obr.16 Profil povrchu [40]

Profil drsnosti – odvozen ze základního profilu. Zkráceně značeno jako R-profil. Je získán potlačením dlouhovlnných složek a úplně nejkratších vlnových složek. Pro profil je třeba volit základní délku pro měření nerovností [35,40]. Používá se několik délek podle toho, k čemu budou využity. Řadí se mezi ně:

- l_n – vyhodnocovací délka, což je délka ve směru osy X
- l_r – základní délka pro profil drsnosti
- l_w – základní délka pro profil vlnitosti
- l_p – základní délka pro základní profil

Výškové parametry profilu drsnosti – V praktické části této bakalářské práce se budou hodnotit výškové parametry R_a a R_z , proto je nutno vědět, jak je na profilu drsnosti najít (viz obrázek níže).



Obr.17 Výškové parametry drsnosti [41]

- Největší výška profilu R_z [μm]

Za parametr R_z se považuje součet výšky nejvyššího výstupku profilu Z_p a hloubky nejnižší prohlubně profilu Z_v v rozsahu dané základní délky l_r [40].

- Největší hloubka prohlubně profilu R_v [μm]

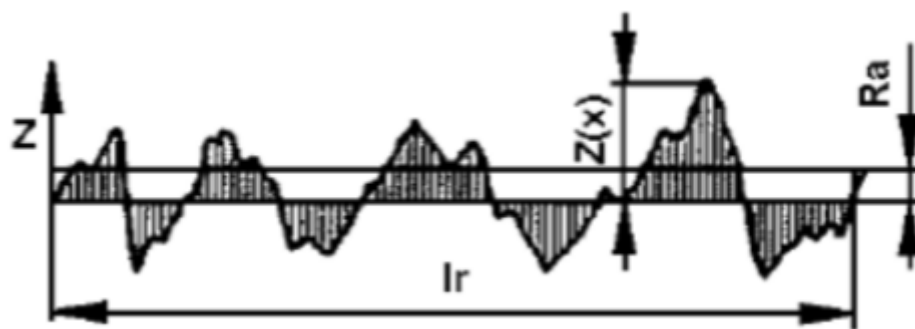
Tento parametr je definován jako hodnota nejnižší prohlubně profilu Z_v v rozsahu dané délky l_r [40].

- Největší výška výstupku profilu R_p [μm]

Jedná se o výšku Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu dané základní délky l_r [40].

- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [μm]

Parametr R_a je definován jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ na určeném rozsahu délky l_r [40].



Obr.18 Grafické znázornění průměrné aritmetické úchylky [44]

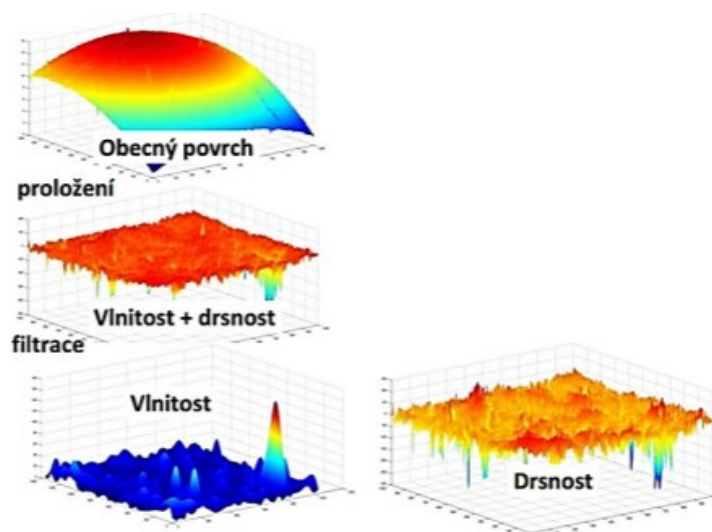
Matematické vyjádření aritmetické úchylky se zapisuje jako:

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (4.1)$$

4.2 Plošné parametry drsnosti povrchu

Plošné neboli trojrozměrné měření a snímání struktury povrchu vzorku umožňuje snímání povrchu kvalitněji, na vyšší úrovni posouzení drsnosti povrchu. Tato metoda používá poznatky z profilové (dvojměrné) metody a rozšiřuje je o nové informace. Při vyhodnocení ploch se postupuje podobně jako u metod profilových ale s tím rozdílem, že se zkoumá ve všech třech osách [45].

V případě této bakalářské práce budeme pracovat s tzv. S-parametry, což jsou parametry používající data z definiční plochy. Dále můžeme pracovat s V-parametry, které jsou parametry objemu materiálu nebo prázdného objemu používajícího data z křivky nosného poměru materiálu [46]. Pro zjištění chtěných parametrů je třeba provést filtraci povrchu, čímž docílíme separaci složek struktury povrchu.



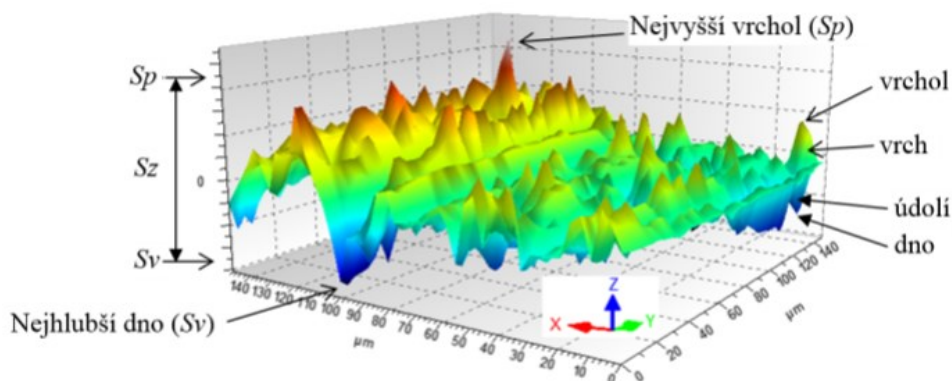
Obr.19 Filtrace plochy

Definice pro práci s trojrozměrným snímáním struktury povrchu:

- S-filtr – filtr, který potlačuje malé stranové složky na povrchu, čímž vytváří z prvotních číselových dat základní povrch [47,48].
- F-operace – odstranění jmenovitého tvaru od základního povrchu. Je nutnou předoperací pro použití mnohých typů L-filtrů. Jeho výsledný S-F povrch je reprezentace povrchu po potlačení šumu S-filtrem a odstranění jmenovitého tvaru pomocí F-operace. Představuje plošný ekvivalent základního povrchu [47,48].
- L-filtr – zde se jedná o filtr potlačující značné stranové složky základního povrchu nebo S-F povrchu. Výsledkem je S-L povrch, což je ekvivalent povrchu drsnosti [47,48].

Zavádí se několik geometrických prvků, které můžeme vypočítat při zkoumání plochy, ty se dělí na bodové, lineární a plošné. Vrcholem se nazývá bod, který je výš než všechny ostatní body v jeho okolí. Všechny čáry nejvyššího spádu končící ve vrcholu tvoří oblast vrchu. Přílehlé vrchy jsou odděleny čarou údolnice. Opak vrcholu je potom dno, což je bod nižší než všechny ostatní v okolí. Oblast, kde čáry největšího spádu končí ve dně, se nazývá údolí. Tato údolí jsou oddělena hřbetnicí. Údolnice a hřbetnice se protínají a následně tvoří množinu bodů, která se nazývá sedlem [38].

Vrcholy a dna jsou tedy považovány za prvky bodové. Údolnice a hřbetnice jsou čarové prvky a vrchy s údolími jsou brány jako plošné prvky. Dále můžeme najít čáru vrstevnice, která spojuje body o stejné výšce.



Obr.20 Základní pojmy plošné metody

Pro vyhodnocení výsledků naměřených na experimentálních vzorcích použijeme výškové parametry plošné drsnosti, které byly zjištěny z geometrických prvků zkoumané plochy. Parametry, které budou porovnávány jsou:

- Průměrná aritmetická výška omezené stupnice posuzované plochy S_a [μm] - aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnice Z a všech bodů v definiční oblasti [38].

Matematicky se vyjádří jako:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.2)$$

- Největší výška omezené stupnice posuzované plochy S_z – dopočítává se jako součet největší výšky vrcholu S_p a největší hloubky dna S_v v definiční oblasti [38].

$$S_z = S_p + S_v \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.3)$$

- Největší výška omezené stupnice povrchu S_p

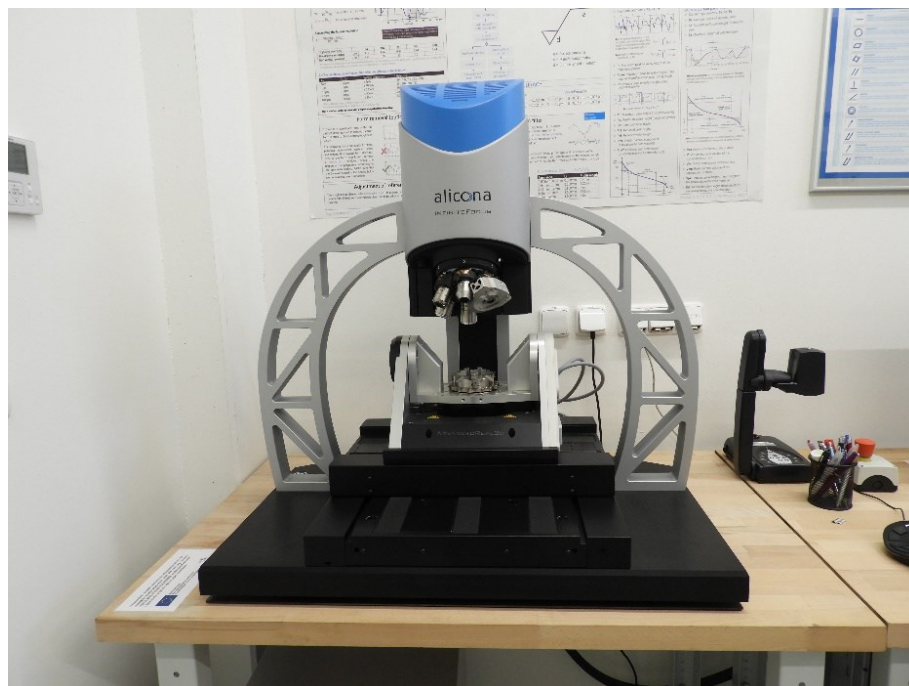
$$S_p = \max\{z_p(x, y)\} \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.4)$$

- Největší hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu S_v

$$S_v = \max\{z_p(l(x, y))\} \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.5)$$

4.3 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5

Celé měření parametrů drsnosti v experimentální části tohoto projektu bylo prováděno na přístroji InfiniteFocus5 od výrobce Alicona (dále už jen Alicona IF). Systém tohoto přístroje je založen na technologii optického dvoudimenzionálního a třídimenzionálního skenování ploch součásti [52]. Jedná se tedy o bezkontaktní způsob měření, což je pro součásti zhotovené 3D tiskem nejlepší volbou. Konvenční kontaktní profilometry totiž nejsou schopny pojmout a vytvořit plošnou strukturu povrchu, která se může v různých místech lišit. Hlavním komponentem tohoto zařízení je systém přesných optických čoček různého provedení, které mohou být doplněny objektivy, což umožňuje měření s různým rozlišením [50]. Tyto objektivy umožní provádět velikost zvětšení od 2,5krát až do 100krát [52]. Celý tento skenovací systém je založen na principu zaostření, které vertikálně povrch měřené součásti skenuje a současně zpracovává měřená data [49]. Podle lesklosti, barvy a jiných vlastností povrchu materiálu vzorku je možno vybrat správný zdroj bílého světla (např. osvětlovací prstenec), a docílit tak ještě vyšší přesnosti měření [50]. Celé měření probíhá zcela automaticky, před spuštěním je jen třeba zkorigovat nasvětlení, zaostření a nastavení výchozích parametrů. Parametry se nastavují za pomoci číselných hodnot a ovládání procesu se provádí přes počítačový software a s pomocí ovladače na způsob joysticku, který řídí posuv stolu a kolébky s upnutým vzorkem [52]. Software IF-Laboratory Measurment je dodán přímo dodavatelem zařízení a je uživatelsky velmi přívětivý. Fotografie měřicího zařízení jsou na Obr. 22 a Obr. 23.



Obr.21 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5



Obr.22 Vybavení metrologické laboratoře Katedry 346.

5. Experimentální část

Cílem experimentální části, této bakalářské práce, je vyhodnocení účinků několika metod dokončovacích operací na součástech s vnitřní lattice strukturou zhotovených aditivní technologií SLM. Vzorky byli vytvořené na 3D tiskárně Renishaw AM400 a následně zpracované příslušnou dokončovací metodou. Elektro-chemické leštění bylo poskytnuto katedrou VŠB 345, leštění plazmou zajistil Ústav výrobných systémů, environmentální techniky a manažmentu kvality Strojnické fakulty STU v Bratislavě. Tryskání bylo provedeno v centru Protolab v areálu VŠB-TU Ostrava a honování AFM nemohlo být z praktických a ekonomických důvodů uskutečněno. Vzorky byli před aplikováním těchto dokončovacích technologií změřeny pro zjištění výchozích parametrů drsnosti. Toto i následné měření výsledných parametrů bylo provedeno optickým mikroskopem Alicona InfiniteFocus G5.

Měřené parametry povrchové drsnosti jsou Ra, Rz, Sa, Sz. Pro co největší srovnatelnost bylo měření provedeno vždy jen na prutech vzorků, které se nacházeli na stejném místě vnitřní struktury. Hlavní výpovědní hodnotu mají profilové parametry drsnosti Ra a Rz. Srovnání účinků technologií je provedeno na základě hodnot profilovým parametrů. Plošné parametry jsou uvedené jen jako doplňkové, jelikož Sa a Sz vychází z převedení povrchu na 3D model a jsou do nich započítané i drsnosti uzlů vnitřní struktury a další nerovnosti povrchu, které nejsou předmětem tohoto experimentu. Paradoxně vyšli u některých opracovaných vzorků plošné parametry ve vyšších hodnotách než parametry naměřené u vzorků výchozích. Z tohoto důvodu nelze brát plošné parametry drsnosti za relevantní.

5.1 Experimentální vzorky

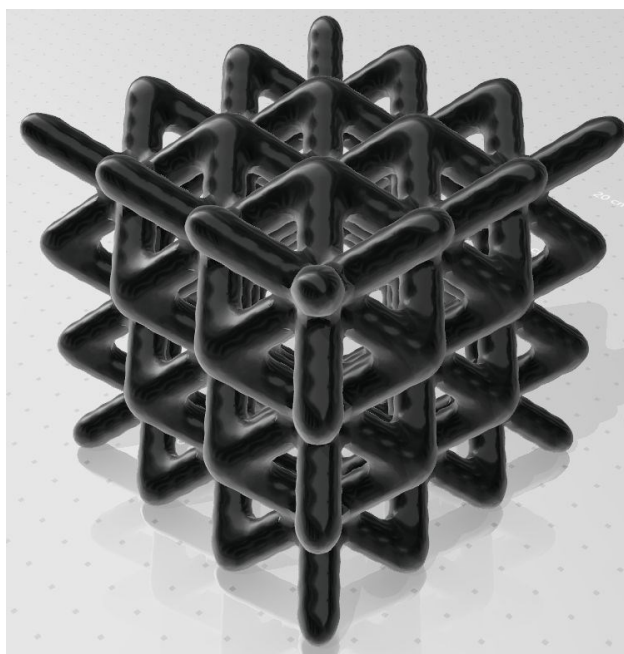
Experimentální vzorky mají primárně tvar krychle, jejich vnitřní struktura je však složená ze vzpěr v podobě mikroprutů a z uzlů, ve kterých se tyto mikropruty potkávají. Z topologického hlediska vychází tyto struktury z plošně středěné kubické mřížky. Vzorků bylo vytvořeno dohromady 16 o čtyřech lišících se sériích. Každá série původně obsahovala jeden vzorek pro příslušnou technologii, z praktických důvodů, zmíněných dále v jednotlivých kapitolách, nebylo možné všechny vzorky pro danou technologii použít. Série se od sebe liší základním rozměrem krychle, ale také průměry jednotlivých mikro prutů. Tyto rozměry tedy ovlivňují množství leštěné plochy ale také celkový objem experimentálních vzorků.

Rozměry, celkové plochy a objemy jednotlivých sérii výchozích vzorků uvádím v Tabulce 2:

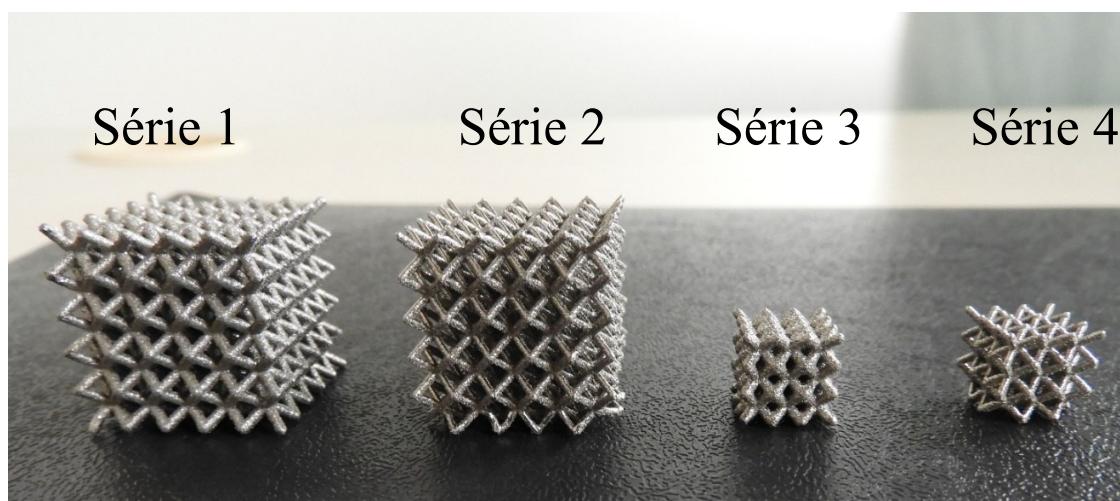
Tab.2 Rozměrové parametry výchozích vzorků.

	Rozměr primární krychle [mm]	Průměr prutu [mm]	Celková plocha vzorku [mm²]	Objem vzorku [mm³]
Série 1	20x20	Ø 1	7 067,103	1 927,631
Série 2	20x20	Ø 0,5	4 288,381	528,726
Série 3	10x10	Ø 1	1 029,560	309,23
Série 4	10x10	Ø 0,5	6 69,735	84,114

Vzorky byli navrženy 3D design softwarem nTopology. Ukázka 3D modelu je na zobrazena na Obr. 24.



Obr.23 3D model vzorku pro Sérii 3 – 20x20xØ1 mm



Obr.24 Experimentální vzorky s výchozími parametry drsnosti

5.1.1 Materiál experimentálních vzorků

Všechny vzorky jsou zhotoveny ze stejného materiálu s označením **316L-0407**. Jedná se o nerezový kovový prášek určený přímo pro 3D tisk na tiskárnách Renishaw. Slitina 316L-0407 je austenitická nerezová ocel. Mimo železný kov obsahuje také legující prvky, a to především vysokou příměs chromu, niklu a molybdenu a následně v menších množstvích i prvky křemíku, manganu, uhlíku, fosforu, síry, dusíku a kyslíku. Přípustný obsah všech obsažených prvků uvádím v tabulce č.3

Tab.3 Přípustný obsah prvků v materiálu 316L-0407

Prvek	Obsažené množství (%)
Železo	Zbytkové množství
Chrom	16.00 až 18.00
Nikl	10.00 až 14.00
Molybden	2.00 až 3.00
Mangan	≤ 2.00
Křemík	≤ 1.00
Dusík	≤ 0.10
Kyslík	≤ 0.10
Fosfor	≤ 0.045
Uhlík	≤ 0.03
Síra	≤ 0.03

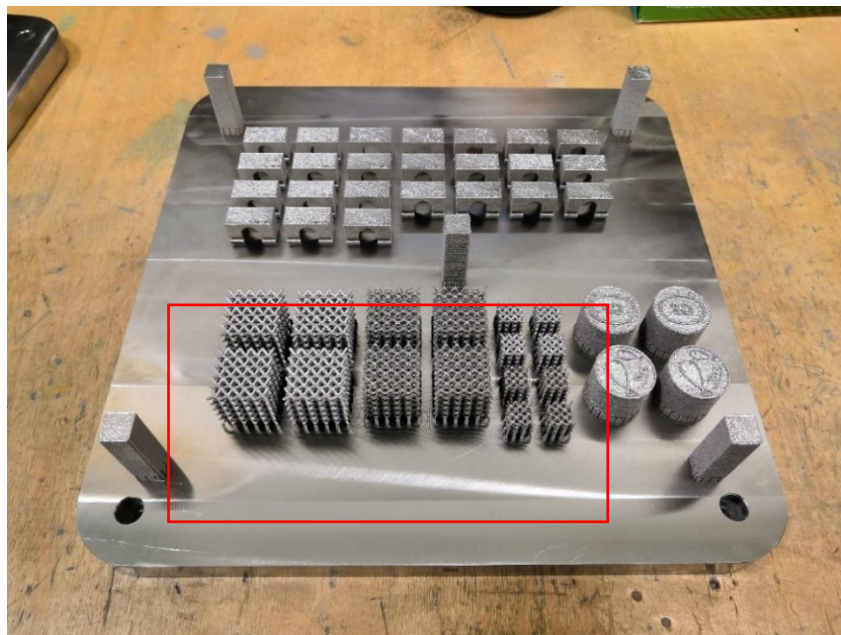
5.1.2 Výroba experimentálních vzorků

Vzorky byli zhotovené na 3D tiskárně Renishaw AM400 v jednom procesu společně s jinými experimentálními vzorky z důvodu efektivnosti práce ale také kvůli ekonomické a energetické úspoře (viz Obr 26).

Pro tisk vzorku byla zvolena skenovací strategie Meander (viz kapitola 2), která je pro tento typ výrobku nejvhodnější, jelikož je určená pro tenkostěnné součásti o malých rozměrech. Parametry tisku byli zvolené na základě použitého materiálu – kovového prášku (viz Tab. 4). Po vtištění byli technologické podpory manuálně odstraněny.

Tab.4 Pracovní parametry pro tisk vzorků

Výkon laseru P	200 W
Rychlost skenování v_{scan}	$650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Výška vrstvy t_{layer}	50 μm



Obr.25 Vytisknuté vzorky na stavěcí desce

5.1.3 Tiskárna RENISHAW AM400

Stroj AM400 (viz Obr. 27) je zařízení pro 3D tisk kovových součástí od Anglické průmyslové společnosti Renishaw. Jedná se o vylepšenou verzi tiskárny AM250. AM400 disponuje vylepšeným řídicím systémem optiky, přepracovaným prouděním plynu, systémem ochrany okna a 400 W optickým systémem s vláknovým laserem o vlnové délce 1070 nm, který poskytuje paprsek o průměru 70 μm . Jako inertní plyn je používán argon, který drží hladinu kyslíku pod 500 ppm. Dále jsou k tiskárně připojeny další nezbytné zařízení a to chladicí jednotka, odvlhčovač vzduchu, mokrá odlučovač, nádoby pro manipulaci s práškem, prosévací zařízení a čidlo pro detekci úniku argonu. Technické parametry tiskárny jsou uvedeny v Tabulce 5.



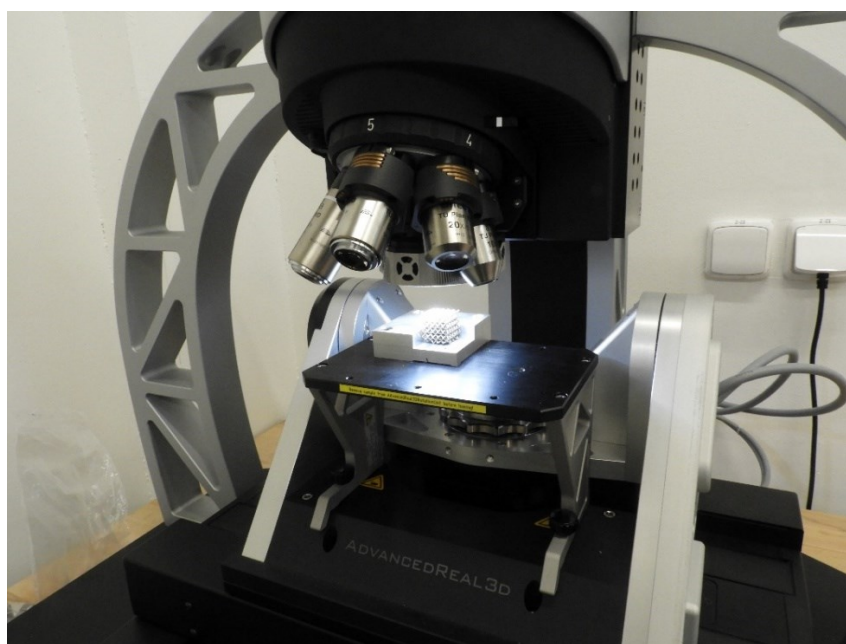
Obr.26 Tiskárna RENISHAW AM400

Tab.5 Technické parametry tiskárny RENISHAW AM400

Maximální pracovní prostor	250 x 250 x 300 [mm]
Rychlost stavby	5 cm ³ – 20 [cm ³ (/h)]
Tloušťka vrstvy	20–100 [μm]
Průměr stopy laseru	70 [μm]
Maximální výkon laseru	400 [W]
Rychlost skenování	2000 [mm · s ⁻¹]
Rychlost polohování	7000 [mm] · s ⁻¹]
Geometrická přesnost	± 50 [μm]
Pracovní tlak v komoře	101–202 [kPa]
Průměr laserového paprsku	70 [μm]
Rozměry bez příslušenství	1700x85x2115 [mm]
Váha	1225 [kg]
Hlučnost	67 [db]

5.2 Výchozí parametry drsnosti

Všechny vzorky byly vyrobeny při jednom procesu za stejných podmínek, a proto lze předpokládat, že vzorky v jednotlivých sériích vykazují stejné hodnoty drsnosti. Jednotlivé série mezi sebou však nelze porovnávat, protože rozdílné rozměry prutů a primární krychle by mohli mít vliv na výslednou povrchovou vrstvu tištěných výrobků. Všechny výchozí vzorky vykazují podobné hodnoty, a to Ra v rozmezí od 20 až 27 μm, Rz v rozmezí 70 až 80 μm, Sa 330 až 1200 μm a Sz v rozmezí od 1640 až 2800 μm.

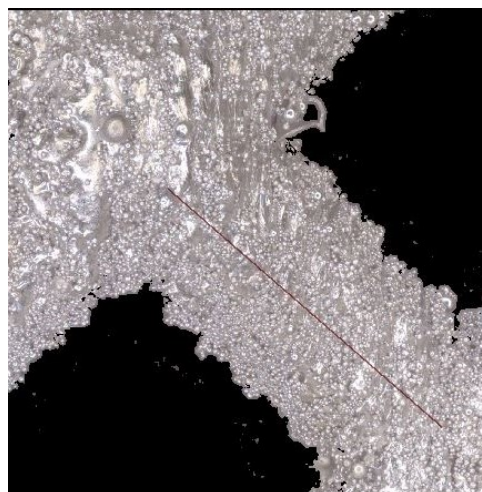


Obr.27 Měření výchozího vzorku optickým mikroskopem InfiniteFocus G5

5.2.1 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 1

Tab.6 Hodnoty naměřené pro vzorek o rozměrech 20x20xØ1 mm

Parametr drsnosti	Hodnota	Jednotka
Ra	20,160	µm
Rz	73,599	µm
Sa	1 138	µm
Sz	2 127	µm

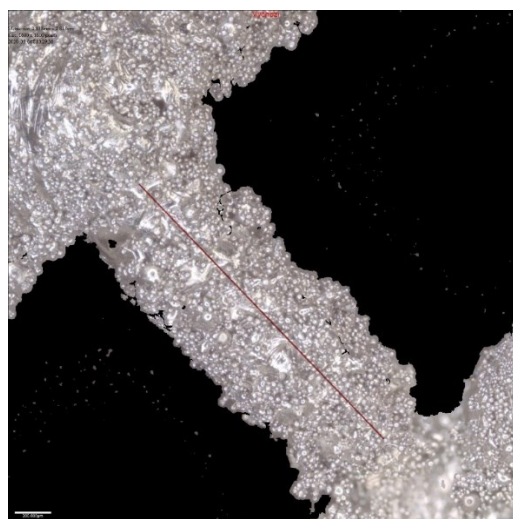


Obr.28 Měřený prut výchozího vzorku 20x20xØ1 mm, 5x zvětšený

5.2.2 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 2

Tab.7 Hodnoty naměřené pro vzorek o rozměrech 20x20xØ0,5 mm

Parametr drsnosti	Hodnota	Jednotka
Ra	26,975	µm
Rz	106,910	µm
Sa	519,910	µm
Sz	1 640	µm

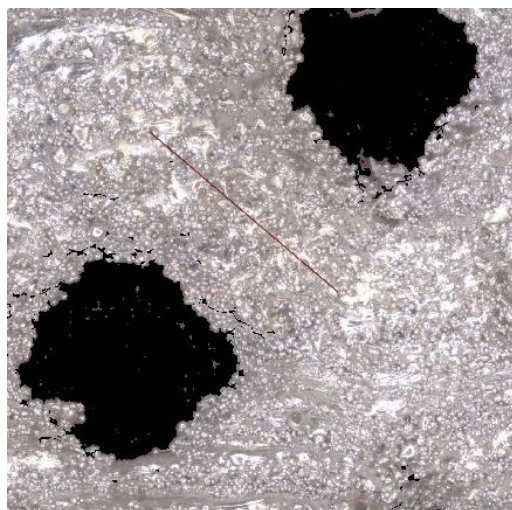


Obr.29 Měřený prut výchozího vzorku 20x20xØ0,5 mm, 5x zvětšený

5.2.3 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 3

Tab.7 Hodnoty naměřené pro vzorek o rozměrech 10x10xØ1 mm

Parametr drsnosti	Hodnota	Jednotka
Ra	23,659	µm
Rz	72,196	µm
Sa	434,301	µm
Sz	1 852	µm

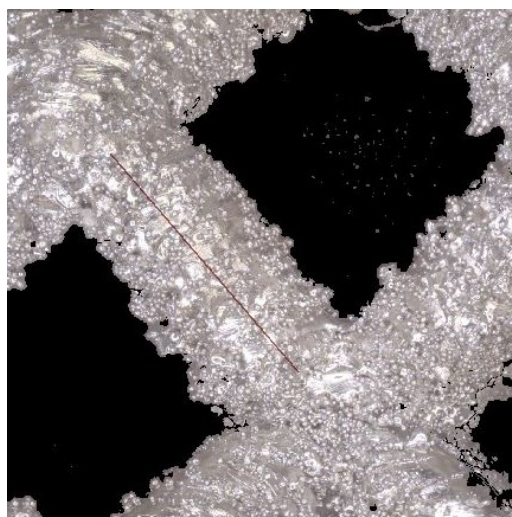


Obr.30 Měřený prut výchozího vzorku 10x10xØ1 mm, 5x zvětšený

5.2.4 Výchozí parametry drsnosti pro Sérii 4

Tab.8 Hodnoty naměřené pro vzorek o rozměrech 10x10xØ0,5

Parametr drsnosti	Hodnota	Jednotka
Ra	21,547	µm
Rz	77,824	µm
Sa	332,699	µm
Sz	2 718	µm



Obr.31 Měřený prut výchozího vzorku 10x10xØ0,5 mm, 5x zvětšený

5.3 Elektrochemické leštění

Elektrochemické leštění bylo provedeno na vzorcích ze Série 1 a Série 2. Použité zařízení byla elektrolytická leštička Struers LectroPol – 5. Použitým elektrolytem byl přípravek pro elektrolytické leštění **Struers A2**, určený pro elektrolytické leštění kovových nerezových součástí (viz Tabulka 9 a Tabulka 10).

Tab.9 Přibližné složení použitého elektrolytu

Kapalina	Množství [ml]
Kyselina Chloristá (HClO_4)	80
Destilovaná voda (H_2O)	120
Ethyl (C_2H_5)	700
2-Butoxyethanol ($\text{BuOC}_2\text{H}_4\text{OH}$)	100

Tab.10 Parametry elektrochemického leštění

Napětí [V]	Doba setrvání [s]
40	15
5	5

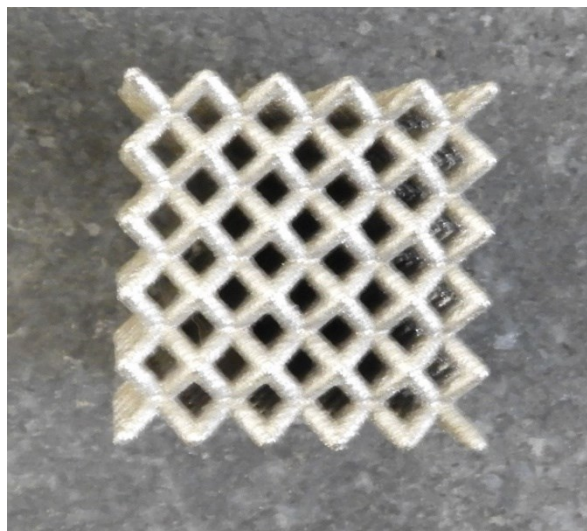


Obr.32 Elektrolytická leštička Struers LectroPol-5

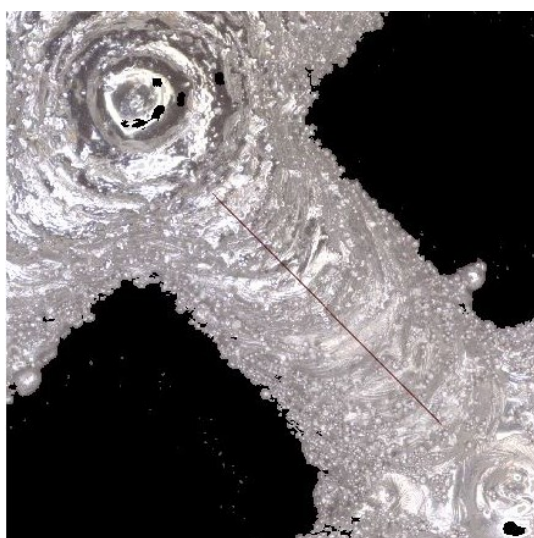
5.3.1 Výsledky měření vzorku ze Série 1 po elektrochemickém leštění

Tab.11 Parametry drsnosti před a po elektrochemickém leštění pro vzorek ze Série 1

Parametr drsnosti	Výchozí vzorek [μm]	Elektrochemický leštěný vzorek [μm]
Ra	20,160	14,052
Rz	73,599	51,845
Sa	1 138	496,825
Sz	2 127	2305



Obr.33 Vzorek o rozměrech 20x20xØ1 mm po elektrochemickém leštění

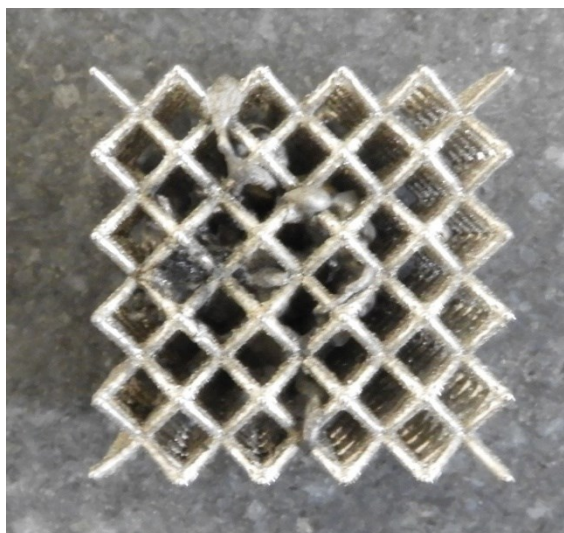


Obr.34 Měřený prut vzorku 20x20xØ1 mm po elektrochemickém leštění, 5x zvětšený

5.3.2 Výsledky měření vzorku ze Série 2 po elektrochemickém leštění

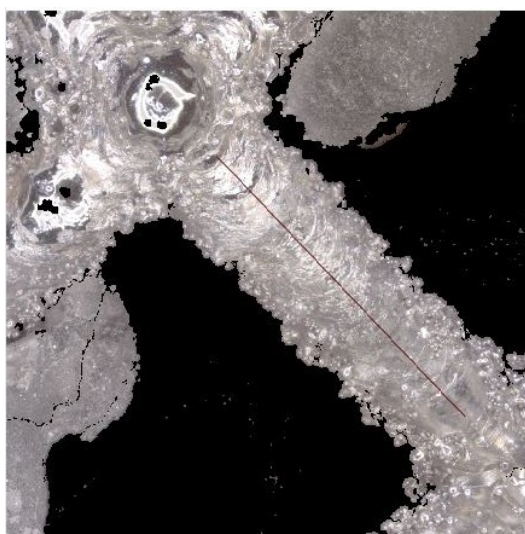
Tab.12 Parametry drsnosti před a po elektrochemickém leštění pro vzorek ze Série 2

Parametr drsnosti	Výchozí vzorek [μm]	Elektrochemický leštěný vzorek [μm]
Ra	26,975	13,796
Rz	106,910	31,094
Sa	519,910	586,079
Sz	1 640	2828



Obr.35 Vzorek o rozměrech 20x20x \varnothing 0,5 mm po elektrochemickém leštění

Z technologických důvodů musel být na vzorky aplikován roztavený cín, který nepožadovaně protekl celou součástí. Tento fakt neměl žádné důsledky na výslednou měřenou profilovou drsnost povrchu. Měření bylo prováděno na prutu, který cínem nebyl zasažen. Ovšem parametry S_a a S_z byli tímto faktem zasaženy, jelikož při tvorbě 3D plochy v softwaru byly zahrnuty i plochy cínu. Toto ovlivnilo vypočtené plošné parametry.



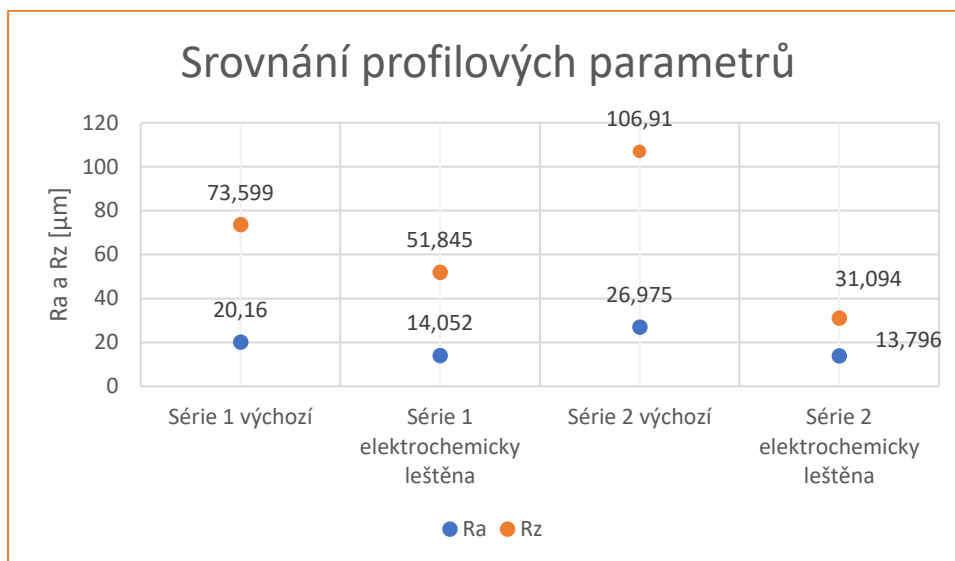
Obr.36 Měřený prut vzorku 20x20x \varnothing 0,5 mm po elektrochemickém leštění, 5x zvětšený

5.3.3 Srovnání naměřených výsledků

U vzorku ze Série 1 se hodnota průměrné aritmetické úchylky R_a zmenší o 6,105 μm , dá se tedy konstatovat, že elektrochemické leštění vylepšilo profilovou drsnost povrchu o cca 30 %. Největší výška profilu R_z se zmenšila o 21,754 μm , což znamená, že plazmatické leštění odstranilo některé rozdíly mezi výstupky Z_p a prohlubněmi Z_v . Parametr R_z , se zmenšil o cca 29 %.

Vzorek ze Série 2 vykazoval lepší změny, což je nejspíš způsobeno menším rozměrem prutů a tudíž i menší hustotou vnitřní struktury. Hodnota průměrné aritmetické úchylky R_a

se zmenšila o 48,86 μm , zlepšení profilové drsnosti povrchu je tedy asi 48 %. Elektrochemické leštění tohoto vzorku odstranilo největší rozdíly Z_p a Z_v a výsledný parametr největší výšky R_z se zlepšil o cca 70 %.



Obr. 37 Srovnání profilových parametrů pro vzorek 20x20x \varnothing 1 mm a 20x20x \varnothing 0,5 mm, elektrochemických leštěných.

5.4 Leštění plazmou

Leštění plazmou bylo provedeno na vzorku ze Série 4, tedy na vzorku s nejmenším objemem. Zařízení pro leštění plazmou bylo navrženo a zkonstruováno zaměstnanci Strojnické fakulty STU v Bratislavě. Stejně tak celý proces byl proveden zaměstnanci této fakulty. Z důvodu pracovních a bezpečnostních omezení tohoto zařízení mohlo být leštění provedeno jen na vzorcích nejmenšího objemu.

Výsledky vzorku zpracovaného tímto procesem nebyly takové, jak bylo při návrhu experimentu očekáváno. Při leštění plazmou vzniká kolem leštěné součásti paroplazmová obálka (viz kapitola 2), která by se ideálně měla vytvořit kolem každého prutu a uzlu, ale jelikož byly vnitřní struktury příliš husté, paroplazmová obálka vznikla jen kolem primární krychle. Takto opracovaný vzorek tedy vykazuje velmi dobře vyleštěné části prutu po vnějších stranách krychle, ale prutům uvnitř součásti zůstala původní drsnost. Pro účel experimentu byly změřeny jen vyleštěné části prutu a zlepšování technologie leštění plazmou pro lattice struktury zůstává otázkou pro další výzkumné práce a experimenty.

Použitý elektrolyt byl roztok na bázi síranu amonného $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Před procesem byl vzorek čištěn ultrazvukově po dobu 180 sekund v 96 % etanolu s teplotou okolí.

Tab.13 Použité parametry leštění plazmou

Parametr	Hodnota	Jednotka
Napětí (U)	250	[V]
Proud (I)	8	[A]
Teplota elektrolytu (T)	80	[°C]
Doba setrvání (t)	8	[min]



Obr.38 Zařízení pro leštění plazmou Strojnické fakulty STU v Bratislavě

5.4.1 Výsledky měření vzorku ze Série 4 po leštění plazmou

Tab.14 Parametry drsnosti před a po elektrochemickém leštění pro vzorek ze Série 4

Parametr drsnosti	Výchozí vzorek [μm]	Elektrochemický leštěný vzorek [μm]
Ra	21,547	6,351
Rz	77,824	10,362
Sa	332,699	310,070
Sz	2 718	3164



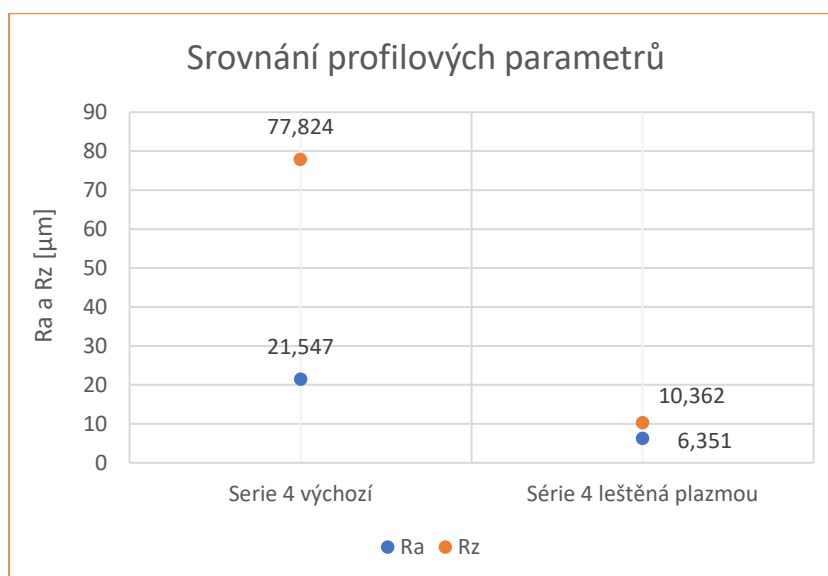
*Obr.39 Vzorek o rozměrech 10x10x \varnothing 0,5 mm
po leštění plazmou*



*Obr.40 Měřený prut vzorku 10x10x \varnothing 0,5 mm
po elektrochemickém leštění, 5x zvětšený*

5.4.2 Srovnání naměřených výsledků

Hodnota průměrné aritmetické úchyvky R_a se zmenšila o 15,196 μm , dá se tedy konstatovat, že leštění plazmou zlepšilo profilovou drsnost povrchu o cca 70%. Největší výška profilu R_z se zmenšila o 67,462 μm , což znamená, že plazmatické leštění odstranilo největší rozdíly mezi výstupky Z_p a prohlubněmi Z_v . Parametr R_z , se zmenšil o cca 85%.



Obr. 41 Srovnání profilových parametrů pro vzorek 10x10x0,5 mm leštěný plazmou.

5.5 Tryskání

Tryskání bylo uskutečněno pískacím boxem SBC 350. Jedná se o zařízení injektorového typu, vybavené kontrolním panelem se spínači, cyklónem pro odsávání prachu a regulátorem vstupního tlaku vzduchu.

Tab.15 Technické parametry pískacího boxu SBC 350

Parametr	Hodnota	Jednotka
Pracovní tlak	4 – 8	[bar]
Spotřeba vzduchu	500 – 1000	[l/min]
Rozměry boxu	1630x1000x610	[mm]
Pracovní prostor	940x600x600	[mm]
Rozměry okna	266x571	[mm]
Rukavice	600	[mm]
Max. zatížení boxu	10	[kg]
Napájení kabiny	230	[V]
Spotřeba odsavače	1200	[W]

Tab.16 Použité pracovní parametry

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr trysky	5	mm
Tlak	7,5	bar

Tryskací média byla použita dvě a byla aplikována jak jednotlivě, tak i v kombinaci. Jedná se o ocelový granulát (ocelové kuličky) a hnědý korund.

Ocelový granulát S170

- Tvar zrna: kulový
- Velikost hlavní frakce: 0,355 – 0,425 mm
- Tvrdost: 390 – 530 HV
- Obsah C: 0,8 – 1,2 %
- Hustota: $> 7,20 \text{ kg/m}^3$



Obr.42 Ocelový granulát S170 [72]

Hnědý korund F-24

- Obsah Al_2O_3 : min. 90 %
- Velikost hlavní frakce: 0,710 – 0,850 mm
- Tvrdost: 9 Mohs



Obr.43 Hnědý korund F-24 [70]

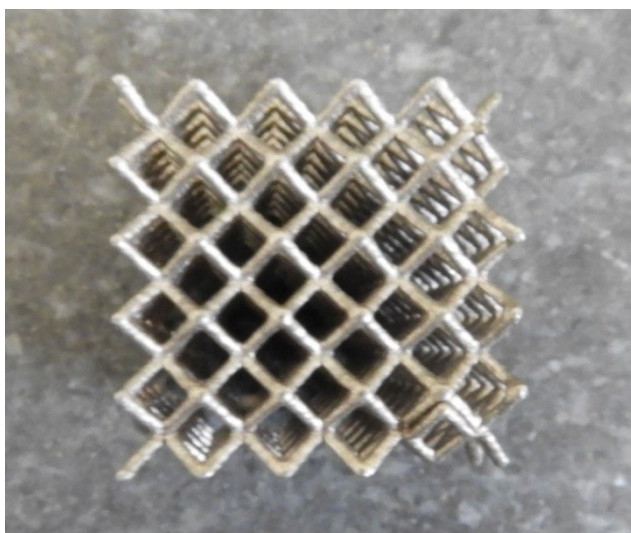
Na vzorku ze Série 2 byla použita obě tryskácí média. Nejprve byl vzorek z tryskán hnědým korundem z každé strany po dobu jedné minuty – celkem tedy 6 minut. Následně byl tryskán ocelovým granulátem také po dobu jedné minuty z každé strany – celkem 6 minut. Dohromady byl tryskácí čas za konstantního tlaku 12 min.

Dále byl tryskán vzorek ze Série 1, a to hnědým korundem po dobu 30 sekund z každé strany – dohromady tedy 180 sekund. Jako poslední byl tryskán vzorek ze Série 3 a opracován byl ocelovým granulátem po dobu 30 sekund z každé strany – celkem tedy 180 sekund.

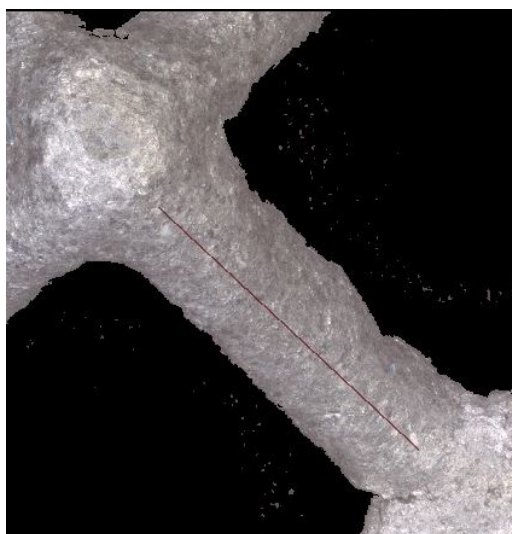
5.5.1 Výsledky měření vzorku ze Série 2 po tryskání hnědým korundem a ocelovým granulátem

Tab.17 Parametry drsnosti před a po tryskání hnědým korundem a ocelovým granulátem pro vzorek ze Série 2

Parametr drsnosti	Výchozí vzorek [μm]	Vzorek tryskaný korundem a ocelovým granulátem [μm]
Ra	26,975	7,02
Rz	106,910	14,30
Sa	519,910	551,85
Sz	1 640	2 159



Obr.44 Vzorek o rozměrech 20x20x \varnothing 0,5 mm po tryskání korundem a ocelovým granulátem



Obr.45 Měřený prut vzorku 20x20x \varnothing 0,5 mm po tryskání korundem a ocelovým granulátem, 5x zvětšený

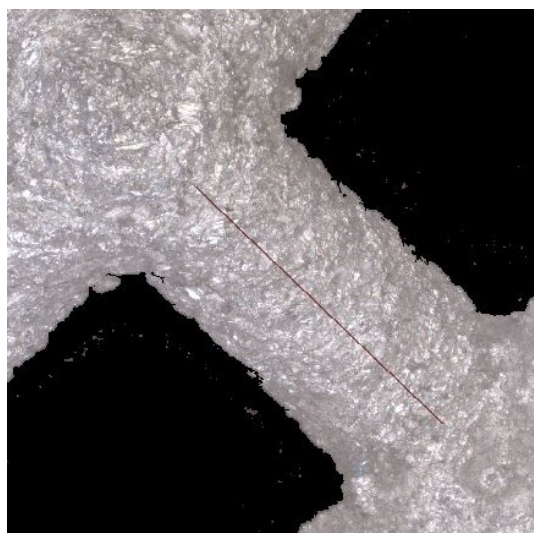
5.5.2 Výsledky měření vzorku ze Série 1 po tryskání hnědým korundem

Tab.18 Parametry drsnosti před a po tryskání hnědým korundem a ocelovým granulátem pro vzorek ze Série 1

Parametr drsnosti	Výchozí vzorek [μm]	Vzorek tryskaný hnědým korundem [μm]
Ra	20,160	16,550
Rz	73,599	55,716
Sa	1 138	1 231
Sz	2 127	1 977



Obr.46 Vzorek o rozměrech 20x20xØ1 mm po tryskání hnědým korundem



Obr.47 Měřený prut vzorku 20x20xØ1 mm po tryskání hnědým korundem, 5x zvětšený

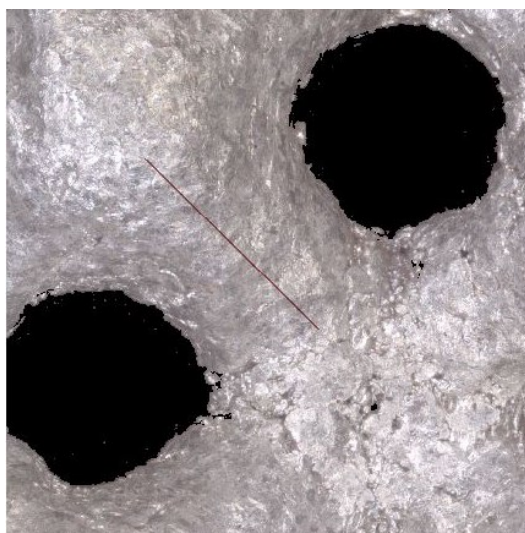
5.5.3 Výsledky měření vzorku ze Série 3 po tryskání ocelovým granulátem

*Tab.19 Parametry drsnosti před
ocelovým granulátem pro vzorek ze Série 1*

Parametr drsnosti	Výchozí vzorek [μm]	Vzorek tryskaný ocelovým granulátem [μm]
Ra	23,659	9,161
Rz	72,196	27,762
Sa	434,301	343,87
Sz	1 852	1 896



*Obr.48 Vzorek o rozměrech 10x10xØ1 mm po tryskání
ocelovým granulátem*



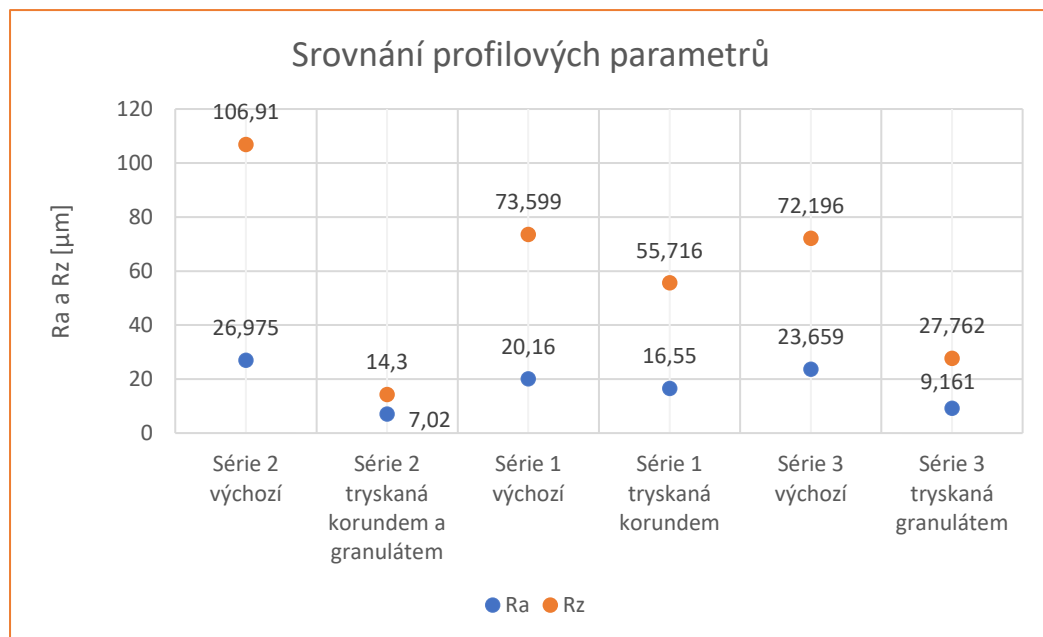
*Obr.49 Měřený prut vzorku 10x10xØ1 mm po tryskání
ocelovým granulátem, 5x zvětšený*

5.5.4 Srovnání naměřených výsledků

Vzorek ze Série 2 o nejmenší hustotě vnitřní struktury tryskaná korundem i ocelovým granulátem vykazuje největší kladnou změnu ze všech vzorků. Rozdíl průměrné aritmetické úchylky Ra je 19,955 μm , tedy zlepšení povrchu o cca 73 % a stejně tak toto tryskání zlepšilo největší výšku profilu Rz o 92,61 μm a procentuálně se tento parametr zlepšil o 86 %.

Naopak nejmenší změna povrchové drsnosti byla změřena na vzorku tryskaném hnědým korundem ze Série 1 a to rozdíl v průměrné aritmetické úchlce jen 3,61 μm , zlepšení tohoto parametru je o 17 %, což je v porovnání s ostatními výsledky velmi malá procentuální hodnota. Podobné nepříliš uspokojivé výsledky byly naměřeny i u parametru největší výšky profilu Rz, a to rozdíl jen o 17 μm a zlepšení o 24 %.

Vzorek o největší hustotě vnitřní struktury ze Série 3 byl tryskán ocelovým granulátem a vykazuje průměrné zlepšení profilových parametrů. Průměrná aritmetická úchylka Ra se zlepšila o 14,498 μm , procentuálně je to potom cca 61 %. Největší výška profilu Rz se zmenšila o 44,434 μm a zlepšení je tedy o cca 61 %.

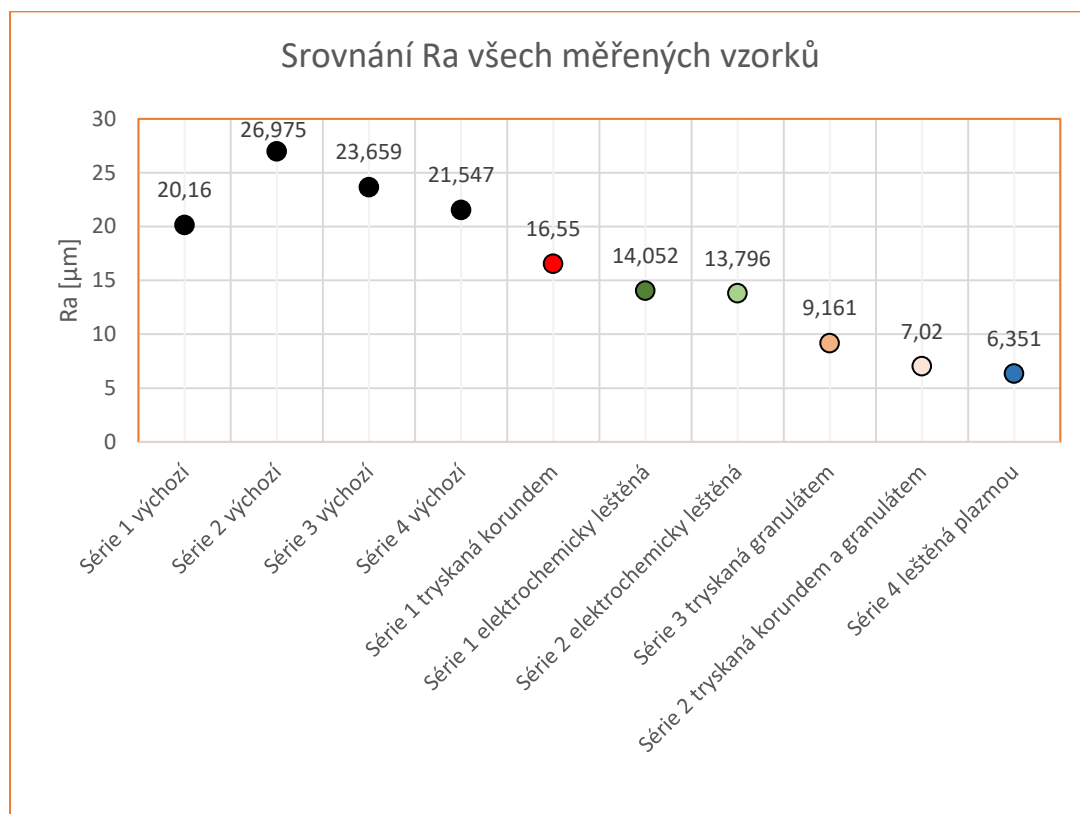


Obr.50 Srovnání profilových parametrů pro vzorky 10x10x \varnothing 0,5 mm; 20x20x0,5 a 20x20x \varnothing 1 tryskaných různými médii.

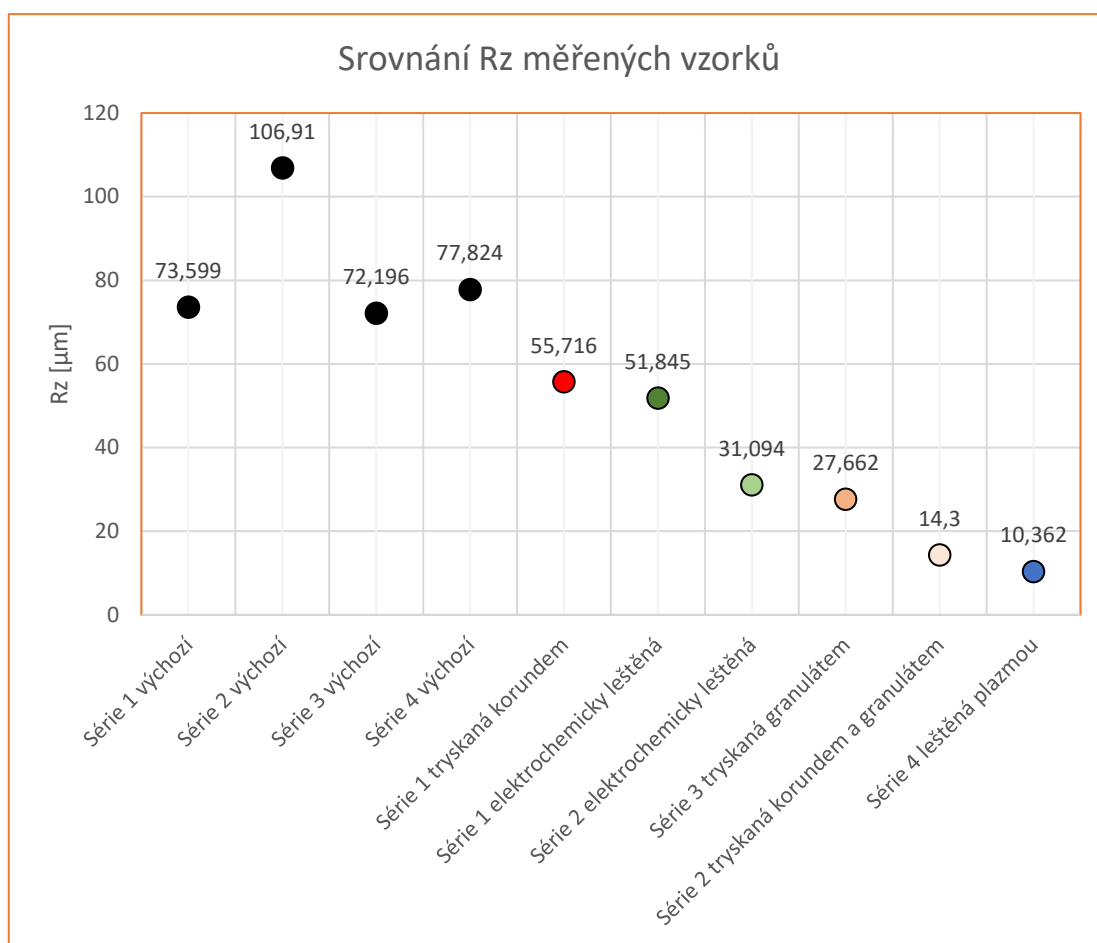
5.2 Celkové zhodnocení naměřených výsledků

V kapitolách 5.3, 5.4 a 5.5 je možné pozorovat vliv jednotlivých technologií na drsnost výchozích vzorků. Již z těchto tabulek a grafů lze vyčíst, která metoda měla nejvyšší účinnost. Nyní porovnáme všechny rozdíly mezi drsnostmi původního vzorku a vzorku zpracovaného dokončovací metodou.

Jako první byli srovnány výsledné profilové parametry mezi jednotlivými vzorky.



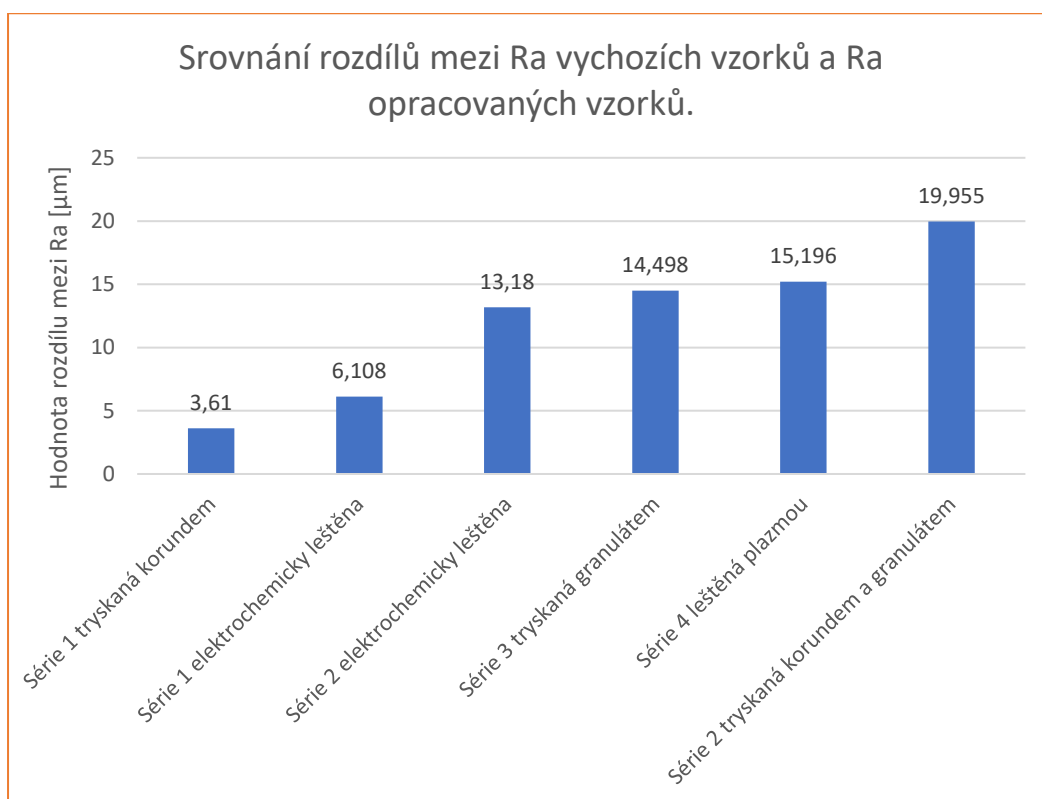
Obr.51 Srovnání výsledných hodnot parametru Ra všech měřených vzorků



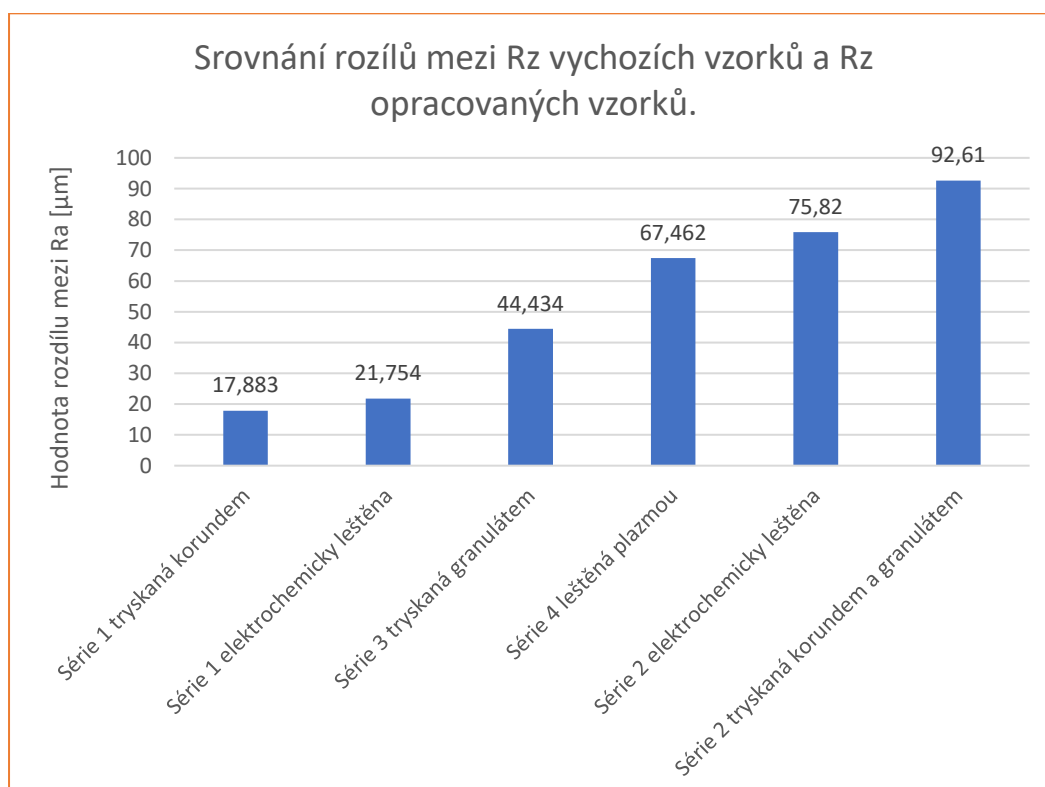
Obr.52 Srovnání výsledných hodnot parametru Rz všech měřených vzorků

Grafické vyobrazení hodnot profilových parametrů je seřazeno sestupně a lze tedy přehledně vidět rozdílné hodnoty mezi jednotlivými vzorky a také určit nejkvalitnější naměřený povrch. Profilové parametry drsnosti Ra a Rz navzájem korespondují a lze konstatovat, že mají stejnou výpovědní hodnotu.

Dále byly srovnány rozdíly mezi profilovými parametry výchozích vzorků a profilovými parametry vzorků opracovaných dokončovacími metodami, tedy hodnoty v μm o které byl povrch materiálu při leštění zlepšen.



Obr.53 Srovnání rozdílů mezi Ra u výchozích vzorků a Ra opracovaných vzorků



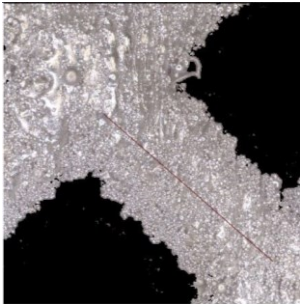
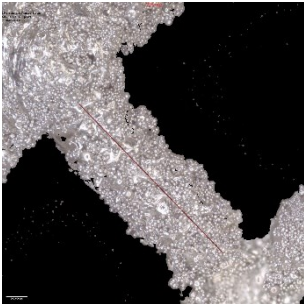
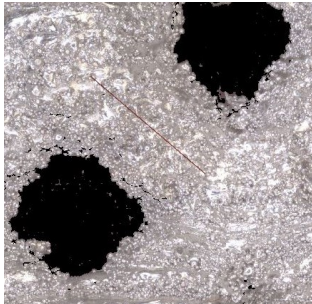
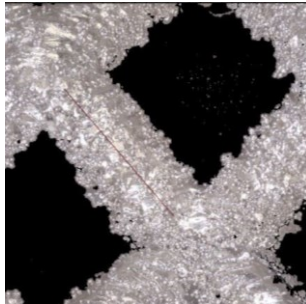
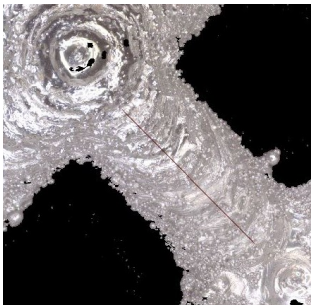
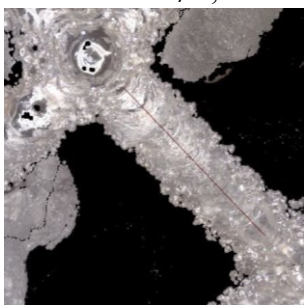
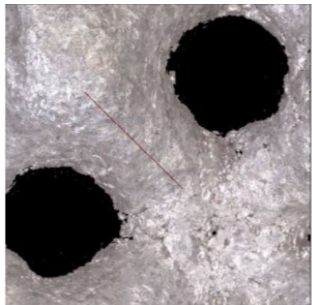
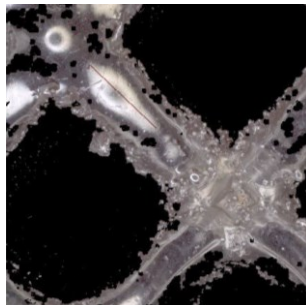
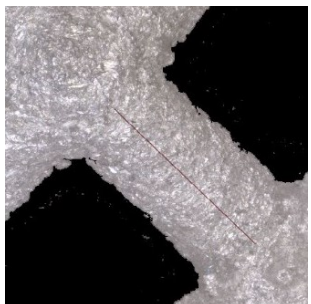
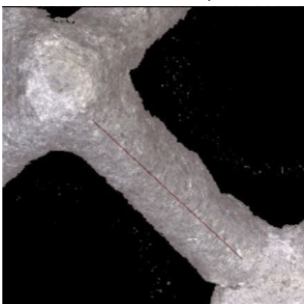
Obr.54 Srovnání rozdílů mezi Rz u výchozích vzorků a Rz opracovaných vzorků

Je vidět, že co se týče aritmetické úchytky Ra, nejvíce materiálu bylo odstraněno na vzorku ze Série 2 tryskaného dvěma médii, ovšem tento vzorek nakonec nevykazoval nejlepší finální drsnost. Toto je nejspíš zapříčiněno tím, že výchozí vzorek Série 2 měl oproti

ostatním výchozím vzorkům nejvyšší hodnotu Ra. Je tedy možné konstatovat, že důkladná technologie tryskání je vhodná na hodně hrubé součásti s vysokou hodnotou drsnosti.

Při porovnání rozdílových hodnot největších výšek profilu Rz vychází, že pro odstranění největších výčnělků na povrchu součástí je taktéž vhodná technologie tryskání ale i elektrochemické leštění mělo u vzorku s největší drsností vysokou hodnotu odebraného materiálu.

Tab. 20 Vizuální srovnání měřených prutů

Výchozí vzorek 20x20xØ1 mm 	Výchozí vzorek 20x20xØ0,5 mm 	Výchozí vzorek 10x10xØ1 mm 	Výchozí vzorek 10x10xØ0,5 mm 
Elektrochemicky leštěný vzorek 20x20xØ1 mm 	Elektrochemicky leštěný vzorek 20x20xØ0,5 mm 	Vzorek tryskaný ocelovým granulátem 10x10xØ1 mm 	Vzorek leštěný plazmou 10x10xØ0,5 mm 
Vzorek tryskaný korundem 20x20xØ1 mm 	Vzorek tryskaný korundem a granulátem 20x20xØ0,5 mm 		

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnocení účinků nekonvenčních dokončovacích aplikací na součástech, s vnitřní lattice strukturou, zhotovených procesem SLM. Pro splnění tohoto cíle byl navržen experiment, při kterém se procesem SLM vyrobilo 16 vzorků. Na těchto vzorcích byly naměřeny výchozí parametry drsnosti. Poté byly na jednotlivé vzorky aplikované dokončovací operace a vzorky byly opět změřeny. Použité nekonvenční aplikace byly elektrochemické leštění a leštění plazmou. Použitá byla i konvenčnější technologie tryskání. Navrhnutá byla i technologie protlačovacího honování AFM. V současné době je však tato technologie na počátku svého rozvoje a v ČR nemá zastoupení. Prvotní návrh byl poslat vzorky do německé průmyslové společnosti, kde by byla tato metoda aplikována. Tato možnost se však ukázala jako ekonomicky velmi nevýhodná a v rámci bakalářské práce neproveditelná. Sekundární úvahou bylo navržení vlastního prototypu přípravku pro tuto aplikaci, ale takto provedená operace by měla minimální účinnost, proto se od této technologie v experimentální části upustilo. Tato metoda však zůstává zahrnuta v teoretické části bakalářské práce jakožto vhodná alternativa k ostatním nekonvenčním metodám.

V první části bakalářské práce jsou uvedeny teoretické informace nutné k pochopení prováděného experimentu. První kapitola vysvětluje vlastnosti a význam lattice struktur, jakožto moderního meta-materiálu. Druhá kapitola shrnuje problematiku aditivní technologie SLM. Dále jsou vysvětleny principy jednotlivých dokončovacích technologií. Poslední kapitola teoretického rozboru je souborem informací o měření a vyhodnocování povrchových vlastností materiálů.

Vzorky byly vytištěné ve čtyřech sériích lišících se rozměrem primární krychle a průměrem prutů lattice struktur. Tyto rozdíly v rozměrech vzorků měly zásadní vliv na praktičnost a použitelnost navržených technologií. Výzkum účinků uvedených dokončovacích aplikací na lattice strukturách je na samém začátku, a tak existuje opravdu pouze minimum vědeckých prací věnovaných této problematice, proto byla praktická část této práce experimentem s těžko předvídatelnými výsledky. U jednotlivých technologií bylo nalezeno několik překážek, které ovlivnily postup i výsledek experimentu.

Vzorkem vykazujícím nejlepší výslednou drsnost byl vzorek leštěný plazmou, na kterém byly naměřeny profilové parametry R_a 6,351 μm a R_z 10,362 μm , což je oproti výchozí drsnosti vzorku zlepšení o víc než 70 %. Nelze však jednoznačně konstatovat, že je leštění plazmou nejvhodnější variantou. Při tomto procesu vzniká kolem leštěné součásti tzv. paraplazmová obálka (viz kapitola 3.2), která by ideálně měla obejmout každý prut zvlášť. Lattice struktury vzorků však byli příliš husté a paraplazmová obálka se vytvořila jen kolem celé primární krychle. Důsledkem tohoto faktu je, že ačkoliv pruty, které se nacházejí na povrchu vzorku, vykazují velmi kvalitní povrch, pruty uvnitř

lattice struktur zůstaly v podstatě nevyleštěné. Takto kvalitní drsnost taktéž nebyla na všech místech prutů konstantní. Další překážkou při zkoumání účinků této technologie byl fakt, že leštění plazmou, i přes její výhody, není rozšířenou metodou. Je tedy obtížné najít nebo zkonstruovat dostatečně kvalitní zařízení, které by bylo schopno provádět tuto technologii. Aby bylo dosaženo lepšího povrchu i uvnitř lattice struktury musely by být vzorky větší s menší hustotou prutů. Námi vyrobené vzorky větších rozměrů nemohly být použity, protože zařízení, na kterém bylo leštění plazmou provedeno, nezvládlo energeticky a bezpečně zpracovat vzorky o takto velkém obsahu materiálu.

Překvapivě dobré výsledky byly naměřeny na vzorcích, které byly dokončené tryškáním. Tryskání korundem sice mělo na výslednou drsnost minimální vliv, ale tryskání ocelovým granulátem přineslo uspokojivé výsledky. Druhá nejlepší povrchová drsnost byla naměřená na vzorku, který byl tryskán nejdříve korundem, který zbavil vzorek všech větších povrchových nedokonalostí, a následně byl tryskán ocelovým granulátem, který výsledný povrch zahladil a vylepšil povrchové vlastnosti zpracovávaných prutů. Výsledná hodnota R_a tohoto vzorku je $7,02\text{ }\mu\text{m}$. Dalším možným aspektem, který ovlivnil výsledek, mimo použitých médií, může být i doba po kterou je součást tryškána. Vzorek, který byl tryskán dvěma médii po dobu 12 minut vykazoval větší úbytek parametrů drsnosti, než vzorek tryškány jedním médiem po dobu 6 minut. Tryskací prostředky při tryskání prolétávaly i dovnitř struktury a alespoň minimálně opracovaly povrch prutů uvnitř primární krychle.

Elektrochemické leštění mělo na vzorky průměrné účinky. Naměřená drsnost vzorků opracovaných elektrochemicky se pohybovala v rozmezí R_a 13–15 μm . Je třeba zmínit, že operace elektrolytická operace všech vzorků trvala asi 20 sekund, v porovnání s ostatními technologiemi lze hovořit o jisté časové úspoře.

Z výsledku experimentu nelze zcela jednoznačně určit, která dokončovací technologie je pro lattice struktury nejlepší, jelikož existuje velké množství pracovních parametrů, které by výsledky mohly ovlivnit. U elektrochemického leštění je třeba vyzkoušet i jiné složení elektrolytu a experimentovat s jinými pracovními časy. Plazmatické leštění mělo velice dobré účinky na leštěný povrch, ovšem omezení potřebného zařízení znemožnilo detailnější výzkum. Použité zařízení nedokázalo pojmout vzorky o potřebném objemu materiálu. Dá se však považovat za velice vhodnou metodu zpracování součástí vytvořených procesem SLM obecně. I u této technologie je třeba nadále zkoumat výsledky jiných pracovních parametrů, např. teplota elektrolytu, složení použitého elektrolytu nebo rozměry leštěných vzorků.

Je důležité zvážit, k čemu budou konkrétní součásti použité. Tryskané vzorky vykazují velmi uspokojivé parametry drsnosti, v porovnání se vzorkem leštěným plazmou však vizuální lesklost povrchu není tak pěkná. Tryskání může zlepšit i jiné povrchové vlastnosti jako je tvrdost nebo zmenšení vnitřního napětí. Další výzkum by

se mohl věnovat kombinaci použitých technologií. Především u kombinace tryskání a následného leštění plazmou je možné předpokládat přívětivé výsledky. Na obrázcích z optického mikroskopu lze vidět, že každá technologie měla jiné účinky na povrchovou texturu a je tedy třeba zvážit jaký výsledek je požadován. Součásti leštěné plazmou by byly vhodné pro konstrukce, ve kterých proudí kapalina. Elektrochemické leštění bylo oproti ostatním technologiím mnohem rychlejší, proto by bylo vhodné jej využít pro hromadnou nebo velkosériovou výrobu, kde by nebyl požadavek na nízkou drsnost povrchu výrobku.

Provedený experiment a celá bakalářská práce může sloužit jako odrazový můstek pro další výzkum týkající se dokončování lattice struktur zhotovených procesem SLM. O lattice strukturách lze hovořit jako o materiálu budoucnosti se spoustou výhod, ale je zapotřebí ještě spousta výzkumné práce odborníků, než budou pro strojírenský průmysl dokonalé.

Seznam použité literatury

- [1] HAO, L., et al. *Design and additive manufacturing of cellular lattice structures* The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP), Taylor & Francis Group, Leiria, 2011
- [2] HAJNYŠ, Jiří. *Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitečných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií*, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 122 stran, 64 obrázků, 29 tabulek. Školitel: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
- [3] ŠURÁNSKY, Martin. *Depozice ultratenkých vrstev pomocí plazmy a metody jejich měření*, Ústav inženýrství polymerů, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012.
- [4] *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí*, První vydání 2009 (Publikační řada Materiály a jejich použití, sv.11), Euro Inox [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf
- [5] *Design for metal AM - a beginner's guide*. [online]. ©2001-2018, 17 August 2017 [cit.2020-03-15] Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/design-for-metal-ama-beginners-guide--42652>
- [6] ABOULKHAIR, N.T, EVERITT N. M., ASHCROFT I., TUCK Ch. *Reducing Porosity in AlSi10Mg Parts Processed by Selective Laser Melting* [online]. University of Nottingham, United Kingdom. Available online 20 August 2014. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860414000062?via%3Dihub>
- [7] ASTM F2924-14. *Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion*. 2014.
- [8] EANE, R. B. *Metal Powder Effects on Selective Laser Sintering*. PhD thesis [online]. University of Leeds, 2002, pp. 236 [cit.2019-12-05] Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Metal-powder-effects-on-selective-laser-sintering-Eane/0169db00e11df6d96dad8e615e3c3201793542>
- [9] KEMPEN, K., THIJS, L., YASA, E., BADROSSAMAY, M a KRUTH, J-P. (2011). *Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg*. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011.

- [10] STUCKER, B. E., STARR, T. L. a GORNET, T. J. Powder Bed Fusion Systems, Apparatus, and Processes for Multi-Material Part Production. September 2014.
- [11] SIMONELLI, M., TUCK, C., ABOULKHAIR, N. T., MASKERY, I., ASHCROFT, I., WILDMAN, R. D., HAGUE, A R. A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. In: Metallurgical and Materials Transactions A (2015). doi: 10.1007/s11661-015-2882-8
- [12] ZAECH M. F., Branner G. *Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting*. German Academic Society for Production Engineering, 2009 [online] [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Investigations-on-residual-stresses-and-in-laser-Zäh-Branner/8cb2405cd720cb81461c9f5bed019fc4c571e47>
- [13] GOLIAŠ P., Odmaštění v galvanotechnice. Tribotechnicka.cz [online] [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62014/odmasteni-v-galvanotechnice.html>
- [14] HRONEK, O., *Zvyšování kvality povrchu proudem abraziva*, Katedra technologie obrábění, Fakulta strojní, ZČU Plzeň, 52 stran. Vedoucí práce: Ing. Ivana Zetková. [online] [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20355/1/Zvysovani%20kvality%20povrchu%20proudem%20abraziva.pdf>
- [15] A.A. Zadpoor, *Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials*. Acta Biomater. (2018) [online] [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30590181>
- [16] PODHORSKÝ Š., PLAZMOVÉ LEŠTENIE TVAROVO ZLOŽITÝCH KOVOVÝCH PREDMETOV. Materiálovotechnologická fakulta, Ústav výrobných technológií Slovenská technická univerzita Bratislava 2007. [online] [cit. 2020-03-28] Dostupné z: http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/029.pdf
- [17] [17] RAVI SANKAR, M., JAIN, V.K., RAMKUMAR, J. *Abrasive flow machining (AFM): An Overview* [online]. Departemnt of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228747468_Abrasive_flow_machining_AFM_An_Overview
- [18] RAUCH, M., *Vliv tryskaní na korozní odolnost oceli*, Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní, ČVUT, Praha, 59 stran. Vedoucí práce: doc. Ing.

- Viktor Kreibich, CSc. [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30590181>
- [19] X.Z. Zhang, et al., *Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges.*, Curr. Opinion Solid State Mater. Sci., 22 (3) (2018), pp. 75-99
- [20] *Extrude Hone AFM.*, 2020 [online]. [cit.2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.extrudehoneafm.com/process/eh-media/>
- [21] KENNAMETAL., *Extrude Hone.*, 2020 [online]. [cit.2020-04-26]. Dostupné z: https://www.deploegtechniek.nl/sites/default/files/ckeditor/exhone_capabilities_broch_july2010.pdf
- [22] CHERIAN, J., ISSAC, J. M., *Fatigue performance in Abrasive Flow Machining* [online]. Research Scholar, Karpagam University, Coimbatore, Tamil Nadu, India. [cit. 2020-24-27]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.845.5672&rep=rep1&type=pdf>
- [23] WANG, A., ChENG K.CH., CHEN K.Y., LIN Y.CH., *A Study on the abrasive gels and the application of abrasive flow machining on complex hole polishing.* [online] Department of MEchanical ENgineering, Chien Hsin University of Science and Technology, Taiwan.[cit. 2020-04-27] Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S221282711731048X?token=B2F07CE733F47CF7F0B981E67C0A67ABBE172E49BE8D83880C20BCD3343459D79FEB443C2B62FA7EDD21E087C109F5D1>
- [24] [24] WANG, X., WANG, C., et al. *Approach for Polishing Diamond Coated Complicated Cutting Tool: Abrasive Flow Machining (AFM).* [online] CHIN. J. Mech. Eng. 31, 97 (2018). [cit. 2020-04-27] Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0296-4>
- [25] Sedláček, A.; *Optimalizace parametrů pneumatického tryskání-tryskací prostředky.* Praha: ČVUT, 2008
- [26] Kreibich, V.; *Teorie a technologie povrchových úprav.* Praha: ČVUT, 1999
- [27] S.A. YAVARI, et al. *Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials* [online]. [cit.2019-12-01]. Dostupné z: https://www.academia.edu/30663410/Relationship_between_un

[it_cell_type_and_porosity_and_the_fatigue_behavior_of_selective_laser_melted_meta-biomaterials](#)

- [28] SPOLMOT., *Abraziva pro kvalitní tryskání a pískování.*, 2016 [online]. [cit.2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.spolmont.cz/abraziva#ocelovadrt>
- [29] RENO - TECH s.r.o.; *Co je pískování? čím se pískuje?* [online]. [2020-04-28] Dostupné z: <http://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje>
- [30] LÁNC, K., *Problematika tryskání povrchů*, Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství, VUT, Brno. Počet stran: 43. Vedoucí práce: Ing. Eva Peterková, Ph.D. [cit.2020-04-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148091
- [31] SCHULZE, Volker. *Modern Mechanical Surface Treatment*. 1. Weinheim: ILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2006. ISBN 9783527607815
- [32] ALABORT, D. BARBA, R.C. REED, *Design of metallic bone by additive manufacturing* [online]. [2020-04-28]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331014095_Design_of_metallic_bone_by_additive_manufacturing
- [33] SVOBODA,P.-BRANDEJS,J.-PROKEŠ,F.: *Základy konstruování*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2003, ISBN 80 - 7204 – 306 – 4
- [34] PISKOVACKA, *Ocelová drť a granulát – vše co o tomto pískovacím abrazivu hledáte.*, 2019 [online]. [cit.2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/ocelova-drt-a-granulat/>
- [35] PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie: část: metrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 151 s. ISBN 80-214- 1997-0.
- [36] Vronka, Jan. *Porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu vytvořeného technologií soustružení*, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-TU, Ostrava. Vedoucí práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D. [online]. [cit.2020-04-30]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117303/VRO0016_FS_B2341_2303R002_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [37] C. YAN, et al., *Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering.*,

- Mater. Sci. Eng. A, 628 (2015), pp. 238-246 [online]. [cit.2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519301145>
- [38] HARČARÍK, Matej. *Měření parametrů textury povrchu výrobků kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc. [online]. [cit.2020-03-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=93094
- [39] D. SHIDID, et al., *Just-in-time Design and Additive Manufacture of Patient-specific Medical Implants.*, Phys. Procedia, 83 (2016), pp. 4-14
- [40] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1*. Praha: ÚNMZ, 1999
- [41] *Drsnost povrchu dle DIN EN ISO* - HOMMEL CS s.r.o. HOMMEL CS s.r.o. [online].
Teplice: HOMMEL CS, 2017 [online] [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.hommeletamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso>
- [42] CLOSE Z. HAO, et al., *Lightweight structure of a phase-change thermal controller based on lattice cells manufactured by SLM.*, CHIN. J. Aeronaut., 32 (7) (2019), pp. 1727-1732
- [43] M. BICI, et al. *Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM Additive Manufacturing* [online] Procedia CIRP, 67 (1) (2018), pp. 215-220 [cit.2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117311460>
- [44] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [45] HOLADA, Jiří. *Problematika měření drsnosti povrchu*, Katedra technologie obrábění, Fakulta strojní, ZČU v Plzni. Vedoucí práce: Ing. Ivana Česáková [online]. [cit.2020-03-06]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/9320/1/bakalarska_prace.pdf
- [46] TYKAL,F.: *Normalizace struktury povrchu, současný stav trendy a vývoje In Kvalita a GPS* 2005, VUT FSI Brno 2005

- [47] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [48] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [49] ALICONA, *Dimensional Metrology & Roughness Measurement – InfiniteFocus*. [online], [cit. 2020-0428]. Dostupné z: <https://www.aliconacom>
- [50] DANZL, R., HELMLI, F., SCHERER, S., *Focus Variation – a New Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology*. [online], Slovenia: Ljubljana, 2009 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2009/PDF/P52.pdf>
- [51] MASKERY, I., et al., *Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices* [online] Addit. Manuf., 16 (2017), pp. 24-29 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316748239_Compressive_failure_modes_and_energy_absorption_in_additively_manufactured_double_gyroid_lattices
- [52] Krejsek, Jiří. Vliv řezné rychlosti na přesnost a drsnost obrobeného povrchu technologií víceosého frézování, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-TU, Ostrava, 2019. Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.
- [53] CHRISTENEN J., F.J.G. DE ABAIO, Anisotropic metamaterials for full control of acoustic waves [online] Phys. Rev. Lett., 108 (12) (2012), p. 124301 29 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9af4/a9a1f08e166a7d826a8f620f51d9fbc8e52c.pdf>
- [54] LEVY U., et al., *Inhomogenous dielectric metamaterials with space-variant polarizability* [online]. Phys. Rev. Lett., 98 (24) (2007), p. 243901 [cit.2019-11-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/6161337_Inhomogenous_Dielectric_Metamaterials_with_Space-Variant_Polarizability
- [55] FANG, N., et al., Ultrasonic metamaterials with negative modulus [online]. Phys. Rev. Lett., 98 (24) (2007), p. 243901 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://www>

- researchgate.net/publication/7132184_Ultrasonic_metamaterials_with_negative_modulus
- [56] HARRIS, J.A., WINTER, R.E., MCSHANE G.J., *Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials* [online]. Int. J. Impact Eng., 104 (2017), pp. 177-191 [cit.2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85014947821&origin=inward&txGid=afd16f09bc85339bdf0d9cc9c576e25>
- [57] GIBSON, L.J., ASHBY, M.F., HARLEY, B.A., *Cellular materials in nature and medicine.*, Cambridge University Press (2010)
- [58] BANHART J., SEELINGER, H.W., *Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications* [online]. Adv. Eng. Mater., 10 (9) (2008), pp. 793-802 [cit.2019-11-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/40830910_Aluminium_Foam_Sandwich_Panels_Manufacture_Metallurgy_and_Applications
- [59] BANHART, J., *Manufacturing routes for metallic foams* [online]. Jom, 52 (12) (2000), pp. 22-27 [cit.2019-11-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225463907_Manufacturing_routes_for_metallic_foams
- [60] SANTOSA, S., WIERZBICKI, T., *Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam* [online]. Comput. Struct., 68 (4) (1998), pp. 343-367 [cit.2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045794998000674>
- [61] SMITH, M., GUAN, Z., W.J. CANTWELL., *Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique* [online]. Int. J. Mech. Sci., 67 (2013), pp. 28-41 [cit.2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740312002639>
- [62] YAN, CH., et al., *Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering* [online]. [cit.2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013613003804>
- [63] GIBSON, L.J., *Modelling the mechanical behavior of cellular materials* [online]. Mater. Sci. Eng. A, 110 (1989), pp. 1-36 [cit.2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0921509389901548>

- [64] ASHBY, M., *The properties of foams and lattices* [online]. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 364 (1838) (2005), pp. 15-30 [cit.2019-11-03]. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2005.1678>
- [65] ZARGARIAN, A., et al., *On the Fatigue Behavior of Additive Manufactured Lattice Structures* [online]. Theor. Appl. Fract. Mech., 100 (2019), pp. 225-232 [cit.2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844218302234>
- [66] XIAO, Z., et al., *Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting* [online] Mater. Des., 143 (2018), pp. 27-37 [cit.2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127518300303>
- [67] XU, S., et al., *Design of lattice structures with controlled anisotropy* [online]. Mater. Des., 93 (2016), pp. 443-44 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127516300120>
- [68] DESHPANDE, V.S., FLECK, N.A., ASHBY, M.F., *Effective properties of the octet-truss lattice material* [online]. J. Mech. Phys. Solids, 49 (8) (2001), pp. 1747-1769 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022509601000102>
- [69] LEARY, M., et al., Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes [cit. 2019-11-03]. Mater. Des., 157 (2018), pp. 179-199 Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127518304763>
- [70] PISKOVACKA, Korund hnědý – pískovací abrazivo (hlavní využití, výhody a nevýhody), 2019 [online]. [cit.2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/korund-hnedy-piskovaci-abrazivo-hlavni-vyuziti-vyhody-a-nevyhody/>
- [71] ABRANOVA, s.r.o., Kovové a nerezové tryskací materiály, 2020 [online]. [cit.2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.abranova.cz/kovove-tryskaci-materialy>
- [72] PISKOVACKA, Ocelový granulát, 2020 [online]. [cit.2020-05-02]. Dostupné z: <https://obchod.piskovacka.cz/ocelovy->

[granulat/?variantId=5156&gclid=Cj0KCQjw-
_j1BRDkARIsAJcfmTF0eQL-
0cQVKMYjgLmQAucRPO3YUYjPMEyE817h95Ayw32IDcB1VPAaAtK4
EALw_wcB](#)